



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

SENZOR PRO RADAROVÝ ADAPTIVNÍ TEMPOMAT

RADAR SENSOR FOR ACTIVE CRUISE CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR ROUS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ MARŠÍK

BRNO 2020

Zadání diplomové práce



Student: **Rous Petr, Bc.**
Program: Informační technologie Obor: Informační systémy
Název: **Radarový senzor pro adaptivní tempomat**
Radar Sensor for Active Cruise Control
Kategorie: Zpracování signálů

Zadání:

1. Nastudujte literaturu související se zpracováním radarového signálu a principy detekce a sledováním vozidel v provozu. Následně se seznamte s vhodným state-of-the-art radar-on-chip řešením, jeho architekturou a principem programování.
2. Nasbírejte reálná data na zapůjčeném odpovídajícím HW a vytvořte komplexní dataset a to včetně anotace a odpovídajícího video záznamu.
3. Po dohodě navrhnete či zvolte metodu, která na základě extrahovaných informací z radarového signálu umožní sledování a vyhodnocení okolního provozu. Tuto ověřte v prostředí MATLAB na nasbíraných datech.
4. Implementujte ověřenou metodu na vhodném HW.
5. Proveďte důkladné vyhodnocení spolehlivosti metody nad nasbíranou datovou sadou. Následně proveďte sérii vhodných testů na zvoleném HW pro ověření funkčnosti a výkonnosti systému v reálném prostředí.
6. Diskutujte dosažené výsledky a navrhnete možné pokračování práce.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 až 3

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Maršík Lukáš, Ing.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, doc. Dr. Ing.

Datum zadání: 1. listopadu 2019

Datum odevzdání: 3. června 2020

Datum schválení: 20. listopadu 2019

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá implementací radarového senzoru pro systém adaptivního tempomatu. V jejím rámci jsou diskutovány použité technologie a postupy, zdokumentován postup implementace zpracování signálu pro daný účel a testování systému na nasbíraných reálných datech. Jako senzor byl využit radarový modul AWR1843 od společnosti Texas Instruments Inc., který reprezentuje aktuálně velmi populární technologii radarů s milimetrovou vlnou. Výsledkem práce jsou dvě aplikace zpracovávající radarová data. Jednou z nich je prototyp aplikace adaptivního tempomatu vizualizující data a druhou je firmware radarového modulu provádějící zpracování signálu přímo na čipu v reálném čase.

Abstract

This master thesis deals with implementation of the radar sensor for adaptive cruise control system. It discusses used technologies and processes and documents implementation of signal processing serving for the purpose of adaptive cruise control. It also describes the testing on the real data gathered in traffic. Texas Instrument's AWR1843 radar module was used as the sensor. This sensor represents currently very popular millimeter wave technology radars. Result of this master thesis are two implemented systems processing digital signal. One of them is a prototype application of the adaptive cruise control system, which also visualises the data. The other is implemented firmware of radar module doing real-time on-chip signal processing according to adaptive cruise control logic.

Klíčová slova

adaptivní tempomat, radar, mmWave, C, Python, digitální zpracování signálu

Keywords

Adaptive Cruise Control, radar, mmWave, C, Python, digital signal processing

Citace

ROUS, Petr. *Senzor pro radarový adaptivní tempomat*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Lukáš Maršík

Senzor pro radarový adaptivní tempomat

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Lukáše Maršíka.

Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....

Petr Rous
9. června 2020

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Maršíkovi za jeho vstřícnost, trpělivost a odbornou pomoc při řešení této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	5
2	Tempomaty a radary	7
2.1	Tempomat	7
2.2	Adaptivní tempomat	8
2.3	Prediktivní tempomat	9
2.4	Radar	9
2.5	Historie radarů	9
2.6	Klasifikace a využití radarů	11
2.7	Základní komponenty radarů	14
2.8	Informace dostupné z radaru	16
3	Fyzika a radary, mmWave radary	18
3.1	Dopplerův jev	18
3.2	Modulace radarového signálu	19
3.3	Radarová rovnice	21
3.4	Technologie mmWave radarů v automobilovém průmyslu	21
3.5	Radarový modul TI AWR1843	22
4	Zpracování radarového signálu	24
4.1	Fourierovy transformace	24
4.2	Měření vzdálenosti	25
4.3	Měření rychlosti	28
4.4	Detekce úhlů	31
4.5	MIMO princip, beamforming	32
4.6	Interference radarových signálů	34
4.7	Logika adaptivního tempomatu	36
5	Návrh řešení, datová sada	38
5.1	Detailní specifikace zadání	38
5.2	Plán práce	38
5.3	Formát dat	39
5.4	Návrh systému	40
6	Implementace	42
6.1	Použité nástroje	42
6.2	Implementace funkčního prototypu	42
6.3	Implementace firmwaru radarového modulu	47

7 Testování	49
7.1 Obecné informace o testování	49
7.2 Sběr dat	50
7.3 Testovací případy a jejich vyhodnocení	51
7.4 Porovnání s radarem RFbeam K-MC4	61
7.5 Zhodnocení výsledků, vylepšení a pokračování práce	61
8 Závěr	63
Literatura	64
A Obsah přiloženého paměťového média	67
B Manuál k aplikaci RadarACC	68
C Konfigurační soubor	69

Seznam obrázků

2.1	Základní komponenty tempomatu	8
2.2	Schéma systému adaptivního tempomatu	9
2.3	Radarové stanice Chain home	10
2.4	Příklady reálných radarových systémů	13
2.5	Základní blokové schéma radaru	15
3.1	Ilustrace Dopplerova jevu zvukového vlnění	19
3.2	Ilustrace fázového (Dopplerova) posunu	20
3.3	Nejpoužívanější typy frekvenční modulace	20
3.4	Závislost útlumu frekvence radarového signálu	22
3.5	Radarový modul TI AWR1843	23
4.1	Chirp signál s frekvencí jako funkcí času	26
4.2	Zpoždění vyslaného a přijatého signálu	26
4.3	Zpoždění vyslaného a přijatých chirpů	27
4.4	Frekvenční spektra signálů	29
4.5	Nejednoznačnost reprodukce fázového posunu signálu	29
4.6	Range-FFT signálu	30
4.7	Ilustrace radarového systému v konfiguraci se dvěma přijímacími anténami.	31
4.8	Porovnání SIMO a MIMO radarových systémů	33
4.9	Ilustrace paralelní a křížové interference	35
5.1	Schéma zpracování signálu na čipu radaru	40
5.2	Schéma postprocesingu dat	40
6.1	Ukázka grafického vizualizačního okna	44
6.2	Diagram toku dat implementovaného systému	45
6.3	Modelová situace jízdních pruhů	46
6.4	Příklady situací ztěžující výběr primárního cíle	47
7.1	Upevnění radarového modulu k vozidlu	51
7.2	Poměr počtu detekovaných objektů podle typu	52
7.3	Jedno vozidlo, rovná silnice	52
7.4	Dvě vozidla v různých jízdních pruzích	53
7.5	Test maximální rozlišitelné vzdálenosti	54
7.6	Detekce postanních objektů	54
7.7	Jízda ve zúžených jízdních pruzích	55
7.8	Problém výběru primárního cíle	55
7.9	Vliv prudké změny směru na detekci radaru	56

7.10	Změna primárního cíle adaptivního tempomatu	57
7.11	Jízda v pomalu jedoucí koloně vozidel	57
7.12	Testovací případ firmwaru – akcelerace	60
7.13	Testovací případ firmwaru – brzdění	60

Kapitola 1

Úvod

Dnešní svět je charakteristický mnoha věcmi, mezi něž rozhodně můžeme řadit i nejrůznější cestování. Pravděpodobně nejrozšířenější formou je automobilová doprava. Se zvyšujícím se počtem vozidel je role řidiče stále náročnější a klade stále větší nároky na přesnost, koncentraci a předvídavost. Zároveň také žijeme v době obrovského vědeckého a technologického pokroku, který nám mimo jiné přináší do života automatizaci všech možných činností.

Spojením výše uvedených tvrzení získáme systém, který je náplní této diplomové práce. Hovoříme o systému adaptivního tempomatu, který řidiči přináší nejen pohodlí při řízení, ale také může značně zvýšit bezpečnost silničního provozu. Zároveň je také jedním ze stěžejních systémů pro aktuálně vyvíjená a testovaná autonomní vozidla.

Tato práce se nezabývá kompletním systémem adaptivního tempomatu, ale pouze jeho jednou, nicméně velice důležitou částí – radarovým senzorem. Čtenář se dozví detaily o různých druzích senzorů, zpracování signálů z nich vycházejících a o možnostech využití pro účely adaptivního tempomatu. Dále je prezentována vlastní implementace prototypu systému adaptivního tempomatu a firmwaru pro konkrétní radarový modul a diskutována jeho využitelnost a přesnost v reálném silničním provozu.

K výběru tohoto tématu mě vedla zejména předchozí zkušenost s problematikou radarů, jelikož jsem v rámci své bakalářské práce pracoval na podobném tématu. Pro tehdejší práci ale byla použita jiná technologie – 24 GHz FMCW radarový modul, který však nebyl primárně designovaný pro využití jako senzor adaptivního tempomatu. Tuto práci jsem si tedy zvolil, protože mě lákala možnost vyzkoušet si novou a pokročilejší radarovou technologii, která je navíc přímo určena k využití v automobilovém průmyslu.

Kapitola 2 přináší obecný pohled na problematiku tempomatů a radarů. Definuje typy a základní vlastnosti tempomatů a jejich využití. Dále pak stručně informuje o historii vzniku radaru, rozdělení radarových systémů podle různých kritérií a jejich využití. Konečně také detailněji popisuje základní komponenty radaru a dává do kontextu frekvence signálu s radarem.

Kapitola 3 pojednává o vztahu fyziky k radarům společně s popisem mmWave radarů. Čtenář zde získá základní informace o Dopplerově jevu, modulaci radarového signálu a radarové rovnici. Ve druhé části kapitoly informuje o technologii mmWave radarových systémů, zejména v kontextu automobilového průmyslu. Jsou zde také popsány základní vlastnosti senzoru TI AWR1843 využívaného v rámci této práce.

Kapitola 4 se věnuje zpracování radarového signálu a extrakci informací z něj. Na začátku čtenáře stručně uvede do problematiky diskrétní Fourierovy transformace. Následně pak postupně popisuje principy, které vedou k získání údajů o vzdálenosti, rychlosti a úhlu detekovaného objektu z radarového signálu. Zmiňuje také různé vysílací režimy antén, řešení

interferencí radarových signálů a nakonec prezentuje jednu z možných metod pro výpočet reakcí systému adaptivního tempomatu.

Následující kapitola 5 se týká návrhu systému a využitých dat. V první části je detailně specifikováno zadání práce v implementačním kontextu a vytvořen plán práce. Dále jsou zde popsány významy a formáty využitých typů dat. Nakonec je uveden zevrubný popis jednotlivých částí systému adaptivního tempomatu.

Kapitola 6 se týká implementace systémů. Je rozdělena na dvě hlavní části postupně detailněji popisující implementaci prototypu systému adaptivního tempomatu v jazyce Python a implementaci logiky adaptivního tempomatu jako firmware použitého radarového modulu.

Předposlední kapitola 7 se zabývá testováním implementovaných systémů a vyhodnocení jejich chování. Na svém začátku obecně popisuje provedené testování a sběr dat. Dále je opět rozdělena na dvě hlavní části a to testování prototypu a testování firmwaru. Na konci kapitoly je také zmíněno porovnání radarů využitých v rámci diplomové a bakalářské práce autora, celkové zhodnocení práce a její možné pokračování.

Závěrečná kapitola 8 stručně shrnuje celou práci.

Kapitola 2

Tempomaty a radary

Tato kapitola je věnována přehledu a hlubší teoretické analýze různých tempomatových systémů a jimi používaných senzorů. Větší prostor je věnován technologiím souvisejícími s touto prací.

2.1 Tempomat

Tempomat je zařízení sloužící k udržování nastavené konstantní rychlosti vozidla. Systém si nechal v roce 1945 patentovat jeho vynálezce Ralph Rowe Teetor a poprvé se ve výbavě vozidla objevil v roce 1958.[26] Nejvhodnějším typem komunikací pro jeho využití jsou bezdrátové dálnice, kde řidiči výrazně zvyšuje jízdní komfort tím, že nemusí šlapat na plynový pedál. Přestože řidiči jeho práci v některých ohledech usnadňuje, v základní verzi tempomat nikterak nepřispívá k vyšší bezpečnosti provozu, ba dokonce v jistých situacích může zvyšovat riziko kolize s jinými účastníky silničního provozu.

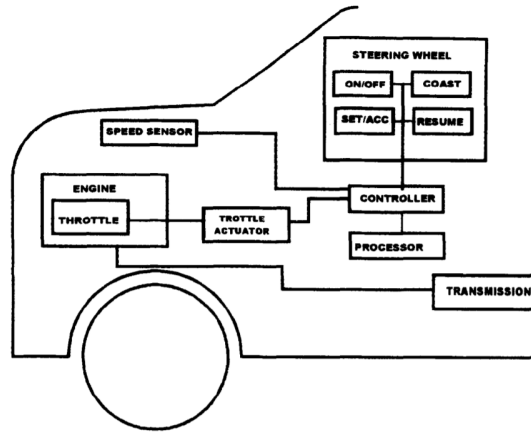
Systém tempomatu se skládá z několika různých komponent a jeho schéma se nachází na obrázku 2.1. V zásadě platí, že klasický tempomat má čtyři hlavní části – rychlostní senzor, ovládací rozhraní, elektronický řídicí modul a regulátor plynu. Mimo zmíněné pak ještě tempomat využívá snímače brzdového a spojkového pedálu, po jejichž sešlápnutí dochází k deaktivaci systému.

Rychlostní senzory jsou buď mechanické, nebo elektronické. Mechanické rychlost vozidla počítají na základě počtu otáček kol a odpovídající konstanty. Moderní elektronické senzory pak vysílají pulzy při otáčení kol a rychlost je odvozována vynásobením vzorkovací frekvencí.

Ovládací rozhraní se obvykle sestává z několika ovládacích prvků umístěných na volantu nebo páčce blinkrů. Nejjednodušší systémy lze pouze zapnout/vypnout a nastavit požadovanou rychlost. U komplexnějších se setkáváme například s funkcí znovuzvolení předchozí nastavené rychlosti stiskem jednoho tlačítka.

Elektronická řídicí jednotka se stará o vyhodnocování prováděných akcí. Jejím vstupem je informace o aktuální rychlosti vozidla z rychlostního senzoru, kterou porovná s nastavenou rychlostí. Výstupem je zaslání odpovídajícího signálu regulátoru plynu pro udržení nastavené rychlosti.

Regulátor plynu zajišťuje přidání/ubrání plynu bez nutnosti šlapání na plynový pedál. V závislosti na typu vozidla existují regulátory, které využívají k ovládní plynu vakuum, nebo elektronické regulátory vysílající signály zajišťující odpovídající reakci.[19]



Obrázek 2.1: Základní komponenty tempomatu. Zdroj [19]

2.2 Adaptivní tempomat

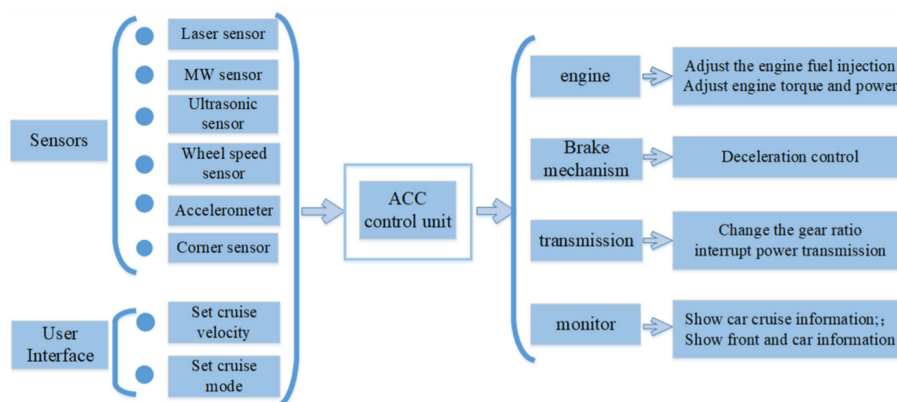
Adaptivní tempomat, anglicky *Adaptive/Active Cruise Control*, zkratka *ACC*, je vylepšená verze tempomatu. Na rozdíl od klasického tempomatu, který konstantně drží zvolenou rychlost vozidla, se adaptivní verze snaží udržet nastavenou rychlost, pokud to aktuální dopravní situace umožňuje. Dokáže tedy autonomně upravit rychlost vozidla relativně vzhledem k vozidlu před ním, a tím pádem kontrolovat bezpečnou vzdálenost mezi nimi. Jako metriku k vyhodnocení odstupu od vozidla vpředu obvykle nepoužívá vzdálenost, nýbrž časový rozdíl mezi vozidly. Tím pádem zohledňuje nejen relativní rychlost mezi za sebou jedoucími vozidly, ale také absolutní rychlost samotného vozidla, což přispívá k vyšší bezpečnosti systému (při vyšší rychlosti je vzdálenost mezi vozidly větší). Schéma adaptivního tempomatu je vidět na obrázku 2.2.

Aby byl systém schopný vyhodnocovat situace před vozidlem, potřebuje ke svému fungování senzor. Nejčastějšími typy senzorů pro adaptivní tempomat jsou radarové a laserové. Oba senzory vyhodnocují situace metodou vyslání signálu a následného přijetí odraženého signálu zpět. Některé systémy mohou využívat také kamery, buď jako plnohodnotná čidla, nebo jako doplňkový zdroj informací k laserovému/radarovému senzoru. Důvodem, proč převažují senzory laserové a radarové nad kamerovými, je zejména jejich nízká ovlivnitelnost nepříznivými povětrnostními podmínkami (například mlhou nebo silným deštěm).

Oproti klasickému tempomatu musí být adaptivní verze schopná ovládat také brzdový systém vozidla, aby mohla regulovat rychlost oběma směry. S přidáním komponenty a větší složitostí systému je také nutná výpočetně výkonnější řídicí jednotka obsluhující kompletní logiku reakcí na nastalé situace. Logika adaptivního tempomatu bude diskutována později v části 4.7.

Průkopníkem na poli adaptivních tempomatů byl v roce 1998 automobilový koncern Daimler Chrysler, který uvedl systém s názvem *DISTRONIC ACC*. V dnešní době je adaptivní tempomat běžně dostupný jako příplatková výbava většiny vozů. Většina výrobců udává, že je jejich systém použitelný až do rychlosti 200 km/h. A jedním dechem také dodávají, že za chování vozidla stále zodpovídá výhradně řidič.

Informace v této sekci byly čerpány zejména ze zdrojů [12], [30] a [26].



Obrázek 2.2: Schéma systému adaptivního tempomatu. Zdroj [30]

2.3 Prediktivní tempomat

Nejnovějším typem mezi tempomaty je prediktivní tempomat (*Predictive Cruise Control, PCC*). Ten rozšiřuje funkcionalitu klasického, potažmo adaptivního tempomatu tím, že se snaží nalézt nejlepší rychlostní profil na základě informací o tvaru a sklonu vozovky a okolním provozu. Pro predikci těchto informací na konkrétní silnici potřebuje dobré mapové podklady, obvykle poskytnuté třetí stranou. Jsou-li tyto informace dostatečně kvalitní a přesné, PCC je může využít a nalézt optimální rychlostní profil na základě komplexních optimalizačních algoritmů. Díky optimální rychlosti v každém konkrétním bodě cesty lze cestovat s nižší spotřebou paliva a kratším časem dojezdu, tedy optimalizovaněji. [10]

V současné době je již tento systém testován různými automobilkami. Ve spolupráci s dalšími pokročilými pomocnými a bezpečnostními systémy vozidel, jako je asistent rozpoznávání dopravního značení nebo asistent jízdy v jízdním pruhu, se PCC může stát jedním ze základních stavebních kamenů vývoje autonomně řízených vozidel.

2.4 Radar

Radar, zkratka z anglického sousloví *RAdio Detection And Ranging*, v překladu rádiové rozpoznání a zaměřování, je elektromagnetický senzor využívaný pro detekování, lokalizaci, sledování a rozpoznávání objektů různých druhů v dosažitelné vzdálenosti. Pracuje na principu vysílání a přijímání rádiových vln.

2.5 Historie radarů

Jelikož jsou radary složitými systémy složenými z mnoha částí a využívající mnoha různých fyzikálních principů, přirozeně vynálezu radaru předcházely jiné objevy a vynálezy, bez nichž by radar vzniknout nemohl. Základy pro vynález radaru položil skotský matematik a fyzik James Clerk Maxwell v roce 1865, kdy prezentoval svoji teorii elektromagnetického pole. V ní předpověděl existenci elektromagnetického vlnění šířícího se prostorem rychlostí

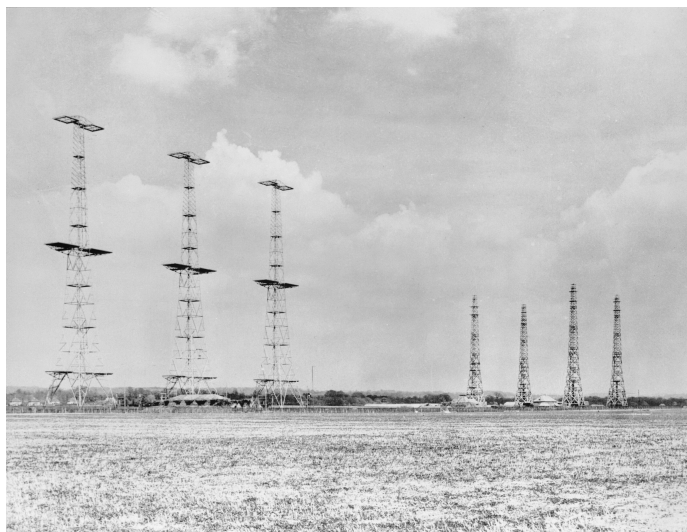
světla. Jeho teorii pak v roce 1888 experimentálně potvrdil německý fyzik Heindrich Rudolf Hertz. Zároveň také poprvé popsal základní vlastnosti elektromagnetického vlnění jako jeho šíření, polarizaci, odraz a lámání.

Výzkum v oblasti radarů začal v osmi státech začátkem 20. století. Těmito osmi státy byly Francie, Německo, Itálie, Japonsko, Nizozemsko, Sovětský svaz a Spojené státy americké. První důkaz radarového principu objevil rus Alexander Popov již v roce 1897, když pozoroval rušení vysílaného bezdrátového signálu způsobené proplouvající lodí.

První opravdový a funkční radar sestrojil v roce 1904 německý inženýr Christian Hülsmeier. Pojmenoval jej telemobiloskop a jeho vynález si nechal patentovat. Byl to základní radar s kontinuální vlnou, který umožňoval detekovat přítomnost lodí na moři, nikoliv však jejich pohyb nebo vzdálenost. Telemobiloskop byl schopný detekovat přítomnost lodě až do vzdálenosti dvou mil i v husté mlze. Výkonnost tohoto radaru však byla limitovaná nedostatkem efektivní elektroniky a antén.

V raných fázích vývoje radaru udávalo směr Německo. Dalším významným vynálezem byla roku 1920 elektronka, za níž stojí německý fyzik Heindrich Barkhausen. Ta umožnila sestrojení prvního generátoru mikrovln.

Následný vývoj byl výrazně ovlivněn druhou světovou válkou. Britové, kteří se obávali vyvinutí paprsků smrti svými německými soky, začali také zkoumat elektromagnetické vlny. Zjistili, že jich lze využít pro detekci letadel. V roce 1935 pak Robert Watson-Watt vyvinul a nechal si patentovat prototyp radaru. Na jeho prototypu byl v roce 1937 vystaven slavný radarový obranný systém včasného varování *Chain home*, který v průběhu druhé světové války kontroloval celé jižní a východní pobřeží Britských ostrovů a sehrál klíčovou roli v bitvě o Británii.



Obrázek 2.3: Radarové stanice Chain home. Zdroj https://en.wikipedia.org/wiki/Chain_Home

Dalším historickým průlomem bylo sestrojení magnetronu v roce 1940 pány Randallem a Boothem na Birminghamské universitě. Jednalo se o vylepšenou elektronku, která byla schopná generovat elektromagnetické vlny s mnohem vyšším výkonem i frekvencí a s kratšími vlnovými délkami. Proto se brzy stala nejrozšířenějším zdrojem mikrovln pro radary.

Po válce sloužily radary pro vojenské i civilní účely. První významné poválečné využití radarů bylo na letištích, kde radary poskytovaly dohled nad trasami letadel a taktéž po-

máhaly letadlům s navigací při přistání. Radary také měly významnou roli při zkoumání vesmíru. Již v roce 1946 byl proveden první experiment, při kterém se podařilo zachytit odražený radarový paprsek od povrchu Měsíce. Později, v roce 1961, se podařil stejný experiment s odrazem od povrchu Venuše a o další dva roky později i experiment s odrazem od Marsu.

Zásadní význam mají radary také v meteorologii. První meteorologický radar na území Československa byl instalován v roce 1968 na observatoři Praha-Libuš.

Informace v této sekci pocházejí ze zdrojů [5], [8], [15] a [20].

2.6 Klasifikace a využití radarů

Tato sekce provede čtenáře různými rozděleními radarových systémů. Následně podá informace o nejběžnějších využitích radarů. Informace v této kapitole jsou čerpány zejména ze zdrojů [1], [2] a [18].

Klasifikace radarů podle obecných kritérií

Různé radarové systémy mají jak množství rozdílných, tak i společných vlastností. Rozdělit všechny radary podle jednoho kritéria tedy není možné. Níže je uvedeno jejich rozdělení podle různých jednotlivých vlastností. Platí však, že tyto skupiny nejsou výlučné a konkrétní radar patří současně do několika uvedených kategorií. Mimo tato obecná kritéria je prezentováno i jedno konkrétnější rozdělení podle typu vysílaného signálu, uvedené v následující podkapitole.

- Dělení podle operačního režimu:
 - Primární radarové systémy vysílají signál do všech směrů, který se odrazí od cíle a jeho malá část se vrací zpět k přijímací anténě. Velkou výhodou primárního radaru je fakt, že nevyžaduje žádnou spolupráci s detekovaným objektem. Obvykle jsou využívány k vojenským účelům pro detekci letadel a lodí. Mezi nevýhody počítáme potřebu velkého výkonu vysílaného signálu. Nedokáže také podat přesné informace o cílovém objektu, např. o jeho velikosti a poloze.
 - Sekundární radarové systémy ke své činnosti vyžadují spolupráci sledovaného cíle. Vysílací stanice vyšle k cíli signál (dotaz) a čeká, než daný cíl zareaguje. Cíl pak odešle zpět k pozemní základně zakódované informace o své poloze, výšce apod. K zakódování informací se využívá zařízení zvané transpondér. Základna i cíl navíc musí mít kompatibilní transpondéry, jinak by cíl byl pro základnu nezjistitelný. Sekundární radary patří k základnímu vybavení pracoviště, které řídí letový provoz na letišti a v jeho okolí.
- Dělení podle typu vysílání:
 - Aktivní radary – samy aktivně vysílají signál a následně jej přijímají odražený od detekovaných objektů.
 - Pasivní radarové systémy – nejsou to radary v pravém slova smyslu, spíše se jedná o sofistikované elektronické systémy. Samy nevysílají žádný signál, polohu objektů vyhodnocují na základě jimi vysílaných signálů. Pasivní systémy nacházejí nejčastější využití ve vojenském prostředí pro sledování letadel.

- Dělení podle polohy antén:
 - Monostatické radary – běžné radary, kde vysílač i přijímač sdílejí jednu anténu na stejném místě.
 - Bistatické radary – využívají dvě a více oddělených a na sobě nezávislých antén na různých místech značné vzdálenosti pro vysílání a přijímání signálu. Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem je obvykle podobná vzdálenosti, na které se očekává detekce cíle. Jejich využití je zejména v meteorologii a pro vojenské účely.

Klasifikace radarů podle typu vysílaného signálu

V této podsekcí jsou radary rozděleny z hlediska vlastností jimi vysílaného signálu. Dělení vychází z publikace [20].

- Pulzní radar – tento druh radaru opakovaně vysílá série téměř obdélníkových pulsů. Pulzní radar zároveň nedokáže signál vysílat i přijímat, pravidelně se tedy přepíná mezi vysílacím a přijímacím režimem. Pro detekci pohybujících se objektů využívá posunu Dopplerovské frekvence. Rozlišujeme dva typy pulzních radarů:
 - MTI radar – druh pulzního radaru schopný rozlišit pohybující se objekty od stacionárních. K tomu využívá nízké frekvence opakujících se pulzů. Zkratka pochází z anglického *Moving Target Indication Radar*. Při jeho použití nevznikají nejednoznačnosti v určování vzdálenosti, ale vznikají při měření rychlosti.
 - Pulzní dopplerovský radar – využívá mnohem vyšší frekvence pulzů než MTI radar a na rozdíl od něj dokáže získat jednoznačnou hodnotu rychlosti. Zároveň ale nedokáže jednoznačně určit vzdálenost objektu.
- Radar s pulzní kompresí – tento radar vysílá dlouhé pulzy s vnitřní modulací (obvykle frekvenční nebo fázovou) za účelem zvýšení rozlišení radaru.
- CW radar – česky radar s kontinuální vlnou (z anglického *Continuous Wave Radar*) pracuje tak, že ve stejném okamžiku zároveň signál vysílá i přijímá. Emitovaný signál je sinová vlna. Téměř vždy využívá pro detekci pohybujících se objektů a měření jejich relativní rychlosti posun Dopplerovské frekvence.
- FMCW radar – frekvenčně modulovaný (z anglického *Frequency modulated*) radar s kontinuální vlnou. Je to speciální typ CW radaru, který využívá frekvenční modulace vlnového signálu pro zjištění vzdálenosti objektu.

Nejčastější využití radarových systémů

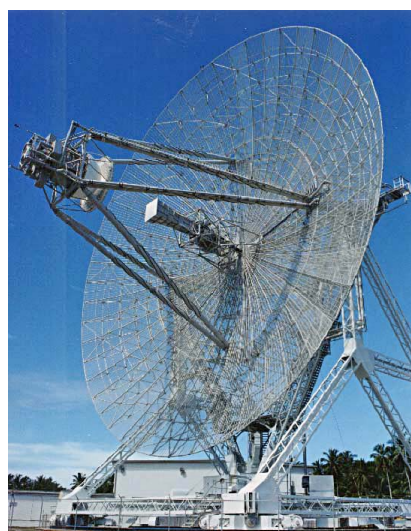
Radarové systémy jsou jedny z nejpokročilejších detekčních a lokalizačních systémů dneška a mají velmi široké využití. To už se dávno neomezuje pouze pro vojenské účely, jako tomu bylo v počátcích vývoje radarových systémů. Naopak jejich využití je velmi různorodé.

- Kontrola letového provozu – radary jsou využívány pro kontrolu a zajištění bezpečnosti letecké dopravy. Používají se zejména v okolí letišť. Mimo jiné hrají klíčovou roli při navádění přistávajících letadel v nepříznivých povětrnostních podmínkách.

- Letecká navigace – radary v oblasti navigace těží ze své neovlivnitelnosti špatnými povětrnostními podmínkami. Zajišťují tedy přesnou navigaci v každé situaci.
- Bezpečnost a navigace lodí – pro lodní dopravu jsou využívány pobřežní radary s vysokým rozlišením, které vysílají signál na moře a pomáhají navigovat plující lodě. Význam tohoto typu navigace roste se špatnými povětrnostními podmínkami. Radary jsou také využívány ke zjišťování hloubky moří.
- Vesmírné využití – radary se využívají k navigaci při spojování družic a kosmických lodí. Satelity a kosmické sondy bývají také vybaveny radary, které jsou využívány jako dálkoměry, výškoměry, nebo pro snímkování povrchu planet. Pozemní radarové stanice pak provádějí sledování satelitů a lodí na oběžných drahách Země.
- Meteorologie – zásadní roli hrají radary také v meteorologii. Dokáží zachytávat a zpracovávat signály odražené od mraků a na základě těchto informací jsou tvořeny předpovědi počasí.
- Kartografie a geodézie – Radarová měření slouží zeměměřičům k přesnému určování polohy objektů v terénu a vzdáleností mezi nimi. Radary jsou také využívány pro dálkový průzkum Země.
- Měření rychlosti – radary jsou dnes již běžnou součástí výbavy policie, která pomocí nich kontroluje rychlost projíždějících vozidel. Často jsou také využívány různé stacionární měřicí radary.
- Vojenské účely – široké využití nachází i ve vojenském prostředí, které stálo u zrodu celé radarové technologie. Dnes slouží například k řízení letového provozu a navigaci, k detekci a sledování pozemních, námořních i vzdušných cílů nebo jako palubní střelecké radiolokátory. Zajišťují také včasnou výstrahu na vzdálenost stovek i tisíců kilometrů v rámci protivzdušné obrany.



(a) Typ radaru využívaný pro detekci letadel.



(b) Anténa radaru dlouhého dosahu využívaná pro sledování vesmírných objektů a balistických střel.

Obrázek 2.4: Příklady reálných radarových systémů. Zdroj obrázků [25].

Kromě výše uvedených hlavních oblastí využití existuje celá řada dalších. Většinou se jedná o specializovaná zařízení, která nelze zařadit do kategorií výše a jejich výčet přesahuje rámec detailů této práce.

2.7 Základní komponenty radarů

Obrázek 2.5 je základním blokovým schématem radaru a ukazuje podsystémy, které v něm obvykle lze nalézt. Toto schéma odpovídá základnímu pulznímu radaru. Sekce vychází ze zdrojů [1] a [20].

Vysílač, ve schématu označený jako *Power amplifier*, generuje elektromagnetický signál vhodného tvaru a posouvá ho na anténu k vyslání. Většina radarů používá krátké pulzní signály, aby byla jedna anténa schopná dostatečně rychle přepínat mezi vysílacím a přijímacím režimem. Generátorem bývá většinou buď oscilátor, nebo zesilovač signálu.

Duplexor je součástka, jež se nachází v pulsních radarech, které využívají pouze jednu anténu na vysílání i přijímání signálu. Zajišťuje přepínání mezi přijímacím a vysílacím módem radaru. Duplexor musí také zajistit, aby nedošlo ke vzájemnému rušení obou signálů. Jelikož přepínání musí probíhat velice rychle (v řádu mikrosekund), neexistují žádné prakticky použitelné mechanické přepínače. Tudíž jsou používány přepínače elektronické.

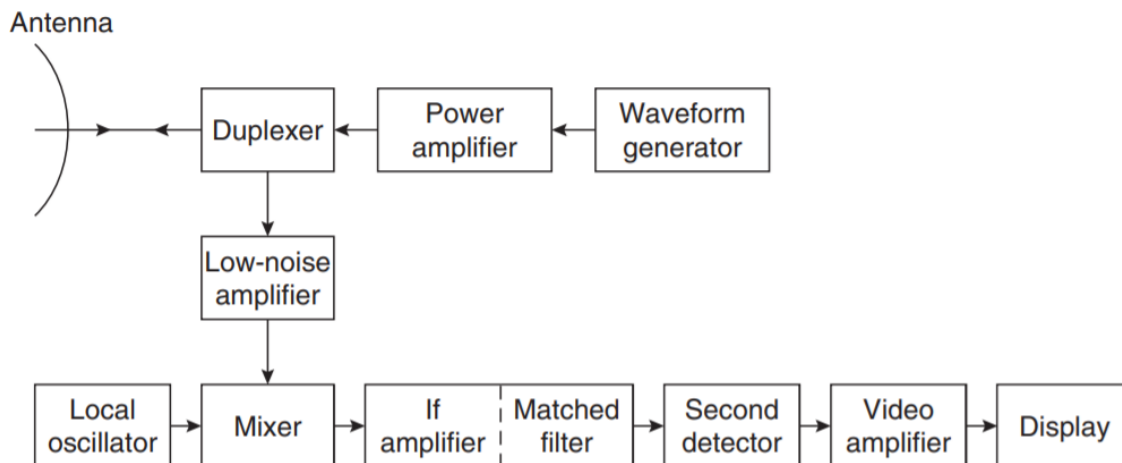
Anténa je zařízení umožňující přenést vysílaný signál do prostoru a přijímat odražený signál. Téměř vždy umožňuje usměrnit signál do úzkého paprsku pro zvýšení jeho výkonu. Taková anténa má obvykle velkou oblast pro příjem signálu, aby bylo možné zachytit i velmi slabé odezvy signálu od cílového objektu. Tato anténa taktéž slouží jako prostorový filtr pro určení úhlu, v jakém se objekt vůči radaru nachází.

Přijímač, ve schématu rozdělený na bloky nacházející se pod duplexorem, zpracovává odražený radarový signál zachycený anténou. Zároveň jej také zesiluje, jelikož přijatý signál je velmi slabý. Ideální přijímač by měl signál zesílit bez jakéhokoliv zkreslení, např. šumu. Protože přijatý signál obsahuje i různé nežádoucí odezvy okolí zvané *clutter*, je nutné, aby měl přijímač dostatečně velký dynamický rozsah, aby nedošlo k jeho zahlcení. Přijímač by také měl zabránit interferenci signálů, aby požadovaná informace mohla být optimálně detekována. Přijímací systém zobrazený ve schématu se nazývá heterodynní. Skládá se ze série kroků zpracování signálu pro správnou detekci cílových objektů. Více o zpracování přijatého signálu je uvedeno v kapitole 4.

Mixér je elektronická součástka, která vytváří nový signál s novou frekvencí kombinací dvou jiných signálů, které do něj vstupují. V radarových systémech se využívá pro složení vyslaného a přijatého signálu dohromady.

Vliv frekvence signálu na radar

Radary v průběhu času operovaly na široké škále frekvencí, od nízkých frekvencí okolo 5 MHz až po velmi vysoké frekvence v řádu desítek GHz. Platí, že vlastnosti, schopnosti a využití radarové technologie se liší v závislosti na frekvenci, s níž operuje. Obecně lze říci, že dlouhých detekčních vzdáleností lze jednodušeji dosáhnout s nižšími frekvencemi. Naopak vyšší frekvence snáze umožňují přesné měření vzdálenosti a polohy. Obecně také platí, že s rostoucí operační frekvencí radaru se až několikanásobně zmenšují fyzické rozměry antény a tedy i celého radaru. Následuje stručný přehled využívaných frekvenčních pásem podle [20].



Obrázek 2.5: Základní blokové schéma radaru. Zdroj [20].

- **HF 3-30 MHz** – *High Frequency*, s vlnovou délkou 10-100 metrů. Systémy v tomto pásmu využívají odrazu energie od ionosféry a jsou využívány pro detekci letadel, lodí a balistických střel.
- **VHF 30-300 MHz** – *Very High Frequency*, vlnová délka 1-10 metrů. Systémy v tomto frekvenčním pásmu byly hojně využívány v minulosti, zejména pro sledování vzdušného prostoru na velkém území. Díky tomu, že odrazové vlastnosti tohoto vlnění od zemského povrchu jsou velmi dobré, bylo možné až zdvojnásobit maximální měřitelnou vzdálenost radaru. Na druhou stranu je pásmo poměrně úzké a neposkytuje dobré rozlišení a přesnost při měření úhlu. Zároveň je toto pásmo také hojně využíváno jinými civilními službami, jako je televizní vysílání, což způsobuje interference a rušení signálu.
- **UHF 300-1000 MHz** – *Ultra High Frequency*, vlnová délka 0,3-1 metr. Většina charakteristik zmíněných u VHF pásma platí také u pásma UHF. Je vhodné pro detekci pohybujících se vzdušných cílů nebo detekci a sledování satelitů a balistických střel. V tomto pásmu navíc operují tzv. *Ground Penetrating Radars*, tedy radary, jež umožňují propagaci signálu do země. Využívají se zejména pro lokalizaci různých zakopaných objektů v zemi, jako potrubí nebo elektrické vedení.
- **L pásmo 1-2 GHz** – vlnová délka 15-20 cm. Toto pásmo preferují radary s dlouhým dosahem (více než 200 námořních mil) pro dohled nad vzdušným prostorem. Se zvyšující se frekvencí je nutné počítat s vlivem deště na výkonnost radarového systému.
- **S pásmo 2-4 GHz** – vlnová délka 7,5-15 cm. Radary v tomto frekvenčním pásmu jsou nejčastěji využívány na letištích pro monitorování leteckého provozu v dané oblasti, typicky do vzdálenosti 50-60 námořních mil. S pásmo je dobrým kompromisem mezi velkým dosahem na nižších a přesností měření na vyšších frekvencích.
- **C pásmo – 4-8 GHz** – vlnová délka 3,75-7,5 cm. Přečhodné pásmo mezi S a X pásmy, kombinující vlastnosti obou. Využívají jej satelitní transpondéry.

- **X pásmo – 8-12 GHz** – vlnová délka 2,5-3,75 cm. Poměrně oblíbené pásmo pro vojenské využití. Je hojně využíváno ve vojenských vzdušných radarech. Často je využito také u mapovacích, navigačních dopplerovských nebo policejních měřicích radarů. Radary operující v tomto pásmu mají obecně menší rozměry, a proto jsou často využívány v případech, kdy je vyžadována snadná mobilita a rozumná váha. K dispozici je již poměrně široký frekvenční rozsah a radary v tomto pásmu jsou již schopné vysílat úzký paprsek signálu s relativně malou anténou.
- **K_u, K, K_a pásma – 12-40 GHz** – vlnová délka 0,75-2,5 cm. Toto frekvenční pásmo využívá vysokých frekvencí, a je tedy atraktivní pro radary menších rozměrů nevyžadujících detekci na dlouhou vzdálenost. V původním K pásmu je signál s frekvencí 22,2 GHz absorbován vodní párou, což způsobuje útlum, jenž může být zásadním problémem při některých využitích. Proto bylo pásmo rozděleno na subpásma, která jsou primárně využívána.
- **Milimetrové pásmo – 40-300 GHz** – *mmWave*, vlnová délka 1-7,5 mm. Technologie milimetrových vln byla zkoumána zejména z důvodu posouvání hranic technologie. Vývoj těchto systémů byl úspěšný a dnes jsou již radary s milimetrovou vlnou využívány produkčně. Milimetrový signál může využívat široké přenosové pásmo, díky čemuž mají radary velmi vysoké rozlišení do vzdálenosti i úhlu a umožňují vysílat úzký paprsek i s malou anténou. Dnes jsou často využívány jako různé senzory, například v automobilovém průmyslu. Do této kategorie patří i radar používaný v rámci této práce.

2.8 Informace dostupné z radaru

Pouhé detekování objektu radarem obvykle není jediná informace, kterou chceme získat. Často nás mnohem více zajímají různé další informace o detekovaném cíli, jako např. rychlost nebo vzdálenost. Tato sekce vycházející ze zdrojů [20] a [28] vyjmenuje typy informací, jež radar poskytuje.

Nelze začít ničím jiným, než informacemi o vzdálenosti a rychlosti objektu. Vzdálenost je měřena na základě času, který rychlostí světla radarem vyslaný signál urazí k objektu a zpět. Žádný jiný senzor nedokáže měřit vzdálenost vzdáleného objektu s takovou přesností jako radar.

Při měření rychlosti objektu obvykle máme na mysli rychlost radiální, tedy rychlost objektu ve směru linie směřující k pozorovateli. Obvykle je získávána z měření dopplerovského frekvenčního posunu. Zároveň také přesné měření rychlosti vyžaduje časovou informaci.

Další informací o stavu objektu v prostoru je úhel definující směr, v němž se detekovaný objekt nachází. Aby bylo možné rozhodnout o směru, je obvykle nutné použití alespoň dvou vzájemně vhodně posunutých přijímacích antén.

Pokud radar disponuje vhodnou přesností v měření vzdálenosti nebo úhlu, může poskytnout informace o velikosti a někdy dokonce i o tvaru objektu. Další důležitou informací, kterou radar nese, je frekvenční šířka pásma signálu, anglicky *bandwidth*. Obecně lze říci, že šířka pásma reprezentuje informace získané radarem, a proto je její volba velmi důležitá. Čím širší je frekvenční pásmo signálu, tím větší a přesnější množství informací o objektu jsme schopni z radaru získat. Na druhou stranu, čím širší pásmo, tím větší je množství šumu v přijatém signálu.

Další informací značně ovlivňující přesnost všech radarových měření je poměr signálu k šumu, anglický známý jako *Signal-to-Noise Ratio*, *SNR*. Přesnost a spolehlivost detekce

objektu závisí na poměru E/N_o , kde E je celková energie přijatého signálu radarem a N_o je výkon šumu na jednotku šířky pásma přijímače. Proto je tento poměr důležitým měřítkem schopností radaru.

Kapitola 3

Fyzika a radary, mmWave radary

Tato kapitola podává stručný přehled vztahu různých fyzikálních principů s radary. Ve druhé části pak detailněji popisuje třídu radarových systémů operujících v milimetrovém frekvenčním pásmu.

3.1 Dopplerův jev

Dopplerův jev je jedním ze základních fyzikálních principů, kterých radary využívají. Popisuje závislost změny frekvence vlnění na vzájemném pohybu vysílače a přijímače. Popsal jej v roce 1842 rakouský fyzik Johann Christian Doppler. Jeho existenci pak potvrdil o tři roky později holandský vědec C. H. D. Buys Ballot. Dopplerův jev je nejnápadněji pozorovatelný u zvuku. Nicméně vzniká i u elektromagnetického vlnění a projevuje se tedy i u mikrovln, rádiových vln nebo viditelného světla. Sekce čerpá ze zdroje [6].

Základní podstatou Dopplerova jevu je změna frekvence vlnění na základě vzájemného pohybu vysílače a přijímače vlnění. Jejich vzájemný pohyb lze v zásadě rozdělit do tří situací – statický vysílač a přijímač pohybující se směrem k vysílači, statický vysílač a přijímač pohybující se směrem od vysílače a současně se pohybující vysílač i přijímač. První dvě situace lze samozřejmě i obrátit, tedy stacionární přijímač a vysílač v pohybu, nicméně fyzikální principy jsou v těchto situacích identické.

V prvním případě, kdy se jeden z objektů přibližuje k druhému, je každá následující vlna odeslána k přijímači z bližší pozice než vlna předchozí. Proto je pro každou následující vlnu zkrácen časový interval mezi vysláním a přijetím signálu, čímž se zvyšuje frekvence tohoto vlnění. Tato situace je ilustrována na obrázku 3.1.

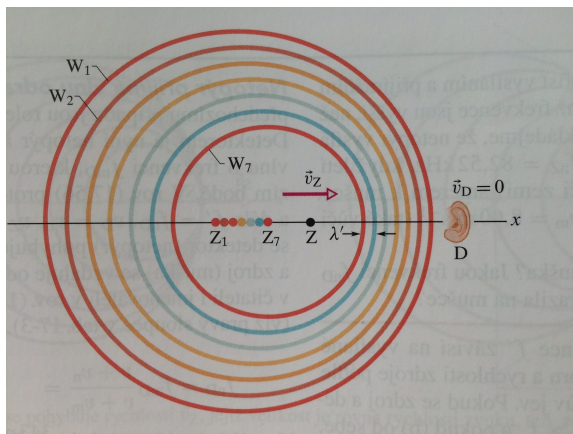
Analogicky v druhém případě, kdy se jeden z objektů vzdaluje od druhého, dochází k prodloužení uražené vzdálenosti každé následující vlny, a proto dochází ke snižování frekvence.

Poslední možnou variantou je vzájemný pohyb přijímače i vysílače, ať už totožným, nebo opačným směrem. V takovém případě vznikne výsledná frekvence vlnění složením dílčích pohybů jednotlivých objektů.

Pro úplnost jsou níže uvedeny fyzikální vztahy, jimiž lze uvedené situace popsat. Je uvažováno pouze elektromagnetické vlnění šířící se vakuem rychlostí světla $c \approx 300\,000\text{ km/s}$.

Pokud jsou přijímač i vysílač v klidu, nebo pohybu rovnoměrném, nedochází ke vzniku Dopplerova jevu a pro výslednou frekvenci vlnění f platí vztah:

$$f = \frac{v}{\lambda}, \tag{3.1}$$



Obrázek 3.1: Ilustrace Dopplerova jevu u zvukového vlnění. Vysílač Z se pohybuje po ose x směrem doprava k přijímači D a tím dochází ke zvyšování frekvence vlnění. Obrázek převzat ze zdroje [6].

kde λ je vlnová délka a v je rychlost šíření vlnění.

Jestliže se pohybuje přijímač a vysílač je statický, vzniká Dopplerův jev a frekvence vlnění f' se vypočte podle vztahu:

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v}, \quad (3.2)$$

kde v_D je rychlost pohybu přijímače k/od vysílači.)

Podobný vztah existuje i pro situaci, kdy se pohybuje vysílač vlnění vzhledem ke statickému přijímači. V takovém případě lze získat frekvenci vlnění f' podle vztahu:

$$f' = f \frac{v}{v \pm v_Z}, \quad (3.3)$$

kde v_Z je rychlost pohybu vysílače vzhledem k přijímači. Složením vztahů 3.2 a 3.3 vznikne vztah pro výpočet frekvence obecného Dopplerova jevu, kdy se nezávisle na sobě pohybují vysílač i přijímač:

$$f' = f \frac{v \pm v_D}{v \pm v_Z}. \quad (3.4)$$

3.2 Modulace radarového signálu

Modulace radarového signálu je velmi významnou částí systému ovlivňující řadu detekčních vlastností. Protože je tato práce primárně zaměřena na FMCW radary, modulace pulzních radarů nejsou v přehledu zahrnuty. Zmíněny jsou pouze hlavní typy modulace signálu s kontinuální vlnou – nemodulovaný, frekvenčně a fázově modulovaný signál. Frekvenční modulace je základní technikou pro měření vzdálenosti radarem. Sekce vychází ze zdrojů [4] a [20].

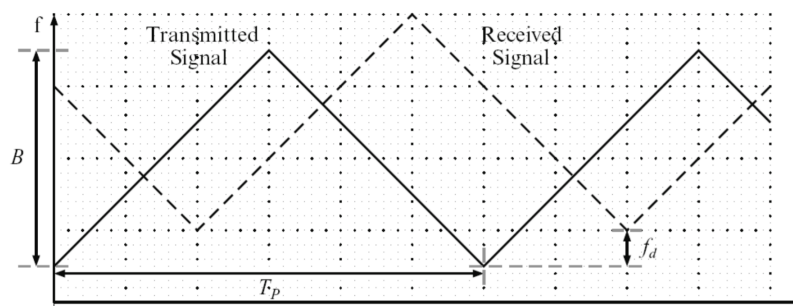
Nemodulovaný radar vysílá stabilní frekvenci s fixní amplitudou signálu. Tyto radary určují rychlost pohybu objektů prostřednictvím frekvenčního posunu způsobeného Dopplerovým jevem. Nedokáží však určit vzdálenost objektů kvůli chybějící modulaci signálu. Modulací jsou totiž do signálu vloženy v podstatě časové značky, které je následně možné využít při zpracování vyslaného a přijatého signálu pro získání dalších informací.

Frekvenčně modulovaný radar využívá frekvenční modulaci vysílaného signálu, aby byl schopen měřit zpoždění šíření signálu a díky tomu určit vzdálenost od detekovaného objektu. Tyto radary potřebují vysílač schopný měnit v určitém rozsahu frekvenci signálu ve velmi krátké časové periodě. Frekvenční modulace bývá u radarů prováděna změnou napětí na oscilátoru generujícímu signál.

Poté, co je signál odražený od objektu zachycen přijímací anténou, dojde k jeho spojení s odpovídajícím původním odeslaným signálem v mixéru. Odražený signál má však jinou fázi než signál vyslaný, jak je vidět na obrázku 3.2. Jejich smíšením je možné získat odpovídající Dopplerův posun a zpoždění způsobené šířením signálu. A z těchto hodnot je již možné získat vzdálenost a relativní rychlost detekovaného objektu podle vztahů

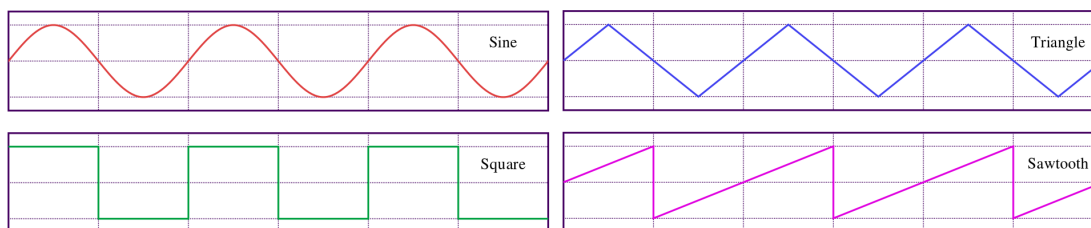
$$R = \frac{cT_p f_1 + f_2}{4B}, v_r = \frac{c f_1 - f_2}{4f_c}, \quad (3.5)$$

kde R je vzdálenost objektu, v_r jeho relativní rychlost vzhledem k radaru, f_1, f_2 jsou frekvence vyslaného a přijatého signálu, B je šířka modulačního pásma, T_p je doba trvání chirpu a f_c je modulační frekvence.



Obrázek 3.2: Ilustrace fázového (Dopplerova) posunu f_d mezi vyslaným (plná čára) a přijatým (přerušovaná čára) signálem. T_p značí délku trvání chirpu, B šířku jeho pásma. Zdroj [4].

Existuje množství různých vzorů frekvenční modulace. Běžné jsou lineárně modulované signály, vytvořit lze například i exponenciálně modulované. Příklady nejpoužívanějších vzorů jsou vidět na obrázku 3.3. Dále je detailněji zmíněna pouze pilová modulace signálu, jelikož je využívána radarem použitým v rámci této práce.



Obrázek 3.3: Příklady průběhu nejpoužívanějších typů frekvenční modulace signálu. Zdroj https://en.wikipedia.org/wiki/Sawtooth_wave.

Pilová frekvenční modulace (anglicky *Sawtooth frequency modulation*) je jedna z nejpoužívanějších modulací. Takto modulovaný přijatý signál je jednoduše zpožděná replika vyslaného signálu s jinou fází způsobenou Dopplerovým posunem. Pilovou modulaci lze

považovat za nejextrémnější případ trojúhelníkové modulace, kdy namísto postupného snižování hodnoty po dosažení vrcholu je hodnota snížena skokově.

Fázově modulovaný radar je typ radaru, který je aktuálně ve výzkumu. V literatuře bývá také označován jako fázově kódovaný. Generování vln je velmi jednoduché a do signálu lze přidat další informace, jako například ID hodnotu využitelnou pro vyhnutí se interferencím. Některé využitelné kódy mají téměř perfektní korelační vlastnosti, což výrazně přispívá ke zlepšení výkonnosti. Ve srovnání s frekvenčně modulovanými radary disponují větší robustností vůči interferencím a dokáží dosáhnout velmi vysokého rozlišení vzdálenosti. Navíc nepotřebují syntetizéry pro vytváření signálů s velmi rychlými změnami. V neposlední řadě také nabízejí možnost využití metody konfigurace antén MIMO (viz sekce 4.5) v kódové doméně, což přináší vysoké úhlové rozlišení.

3.3 Radarová rovnice

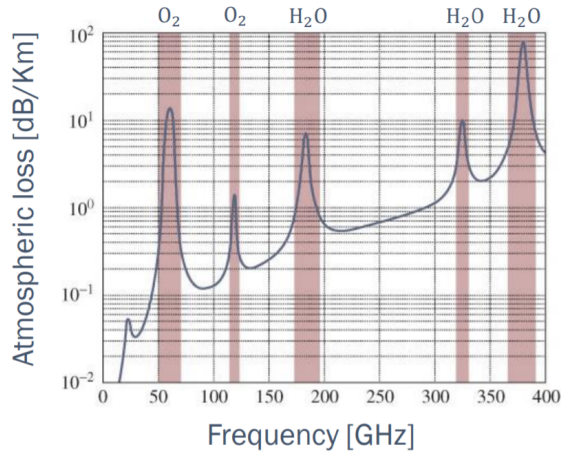
Radarová rovnice je velmi užitečná pro odhad přibližného dosahu, na který je radar schopen detekovat objekt. Je popsána jako funkce charakteristik radaru. Zohledňuje jeho fyzikální závislosti od šíření vln ze zdroje vlnění, až po zpětné přijímání odraženého signálu. Základní a nejběžnější rovnice pro radary využívající jednu anténu k vysílání i přijímání signálu má tvar

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{min}}}, \quad (3.6)$$

kde R_{max} je maximální dosah radaru, P_t je výkon signálu vysílaného anténou radaru, G_t je zisk antény, σ je radiolokační odrazná plocha cíle (měří se v jednotkách plochy a je mírou energie odražené od cíle zpět ve směru radaru), A_e je efektivní plocha antény a S_{min} udává minimální detekovatelný signál. Pro daný radarový systém můžeme hodnoty P_t , G_t a A_e považovat za konstantní, jelikož se příliš nemění. Naopak hodnota radiolokační odrazné plochy σ se může podle potřeby měnit. energii menší než je nejmenší detekovatelná energie S_{min} nelze přijmout, protože se ztratí v okolním šumu. Diagram 3.4 ukazuje závislost útlumu signálu v atmosféře na jeho frekvenci. Rovnicí 3.6 tedy lze spočítat maximální dosah radaru, na který je schopen detekovat minimální přijatou energii. Zdrojem informací je publikace [20].

3.4 Technologie mmWave radarů v automobilovém průmyslu

Technologie milimetrových (mmWave) radarů byla pro výzkumníky dlouhou dobu velkým oříškem. Přestože si uvědomovali výhody, jaké použití těchto radarů v automobilovém průmyslu může přinést, nebyli je dlouho schopni integrovat do systémů. První zprávy o jejich vývoji pochází již ze 70. let 20. století, kdy je řada firem plánovala využít v systémech pro zabránění kolizím. První generace automobilových radarů pracujících v 77 GHz frekvenčním pásmu se dostala na trh až v roce 1998 jako součást systému *Distronic* u vozů Daimler S class. Od roku 2003 pak většina hlavních výrobců vozidel nabízela radarové systémy ve svých vozidlech vyšších tříd, zejména pro zvýšení komfortu jízdy. Od té doby se na trh dostalo několik generací radarových systémů a dnes jsou již asistenční systémy využívající radarový senzor dostupné v mnoha vozidlech střední a vyšší třídy.



Obrázek 3.4: Diagram závislosti frekvence radarového signálu a útlumu signálu způsobeného atmosférou. Zdroj [9].

V automobilovém průmyslu dominují radarové senzory pracující ve dvou různých frekvenčních pásmech – 24 GHz a 77 GHz. Z inženýrského úhlu pohledu je 77 GHz technologie mnohem komplikovanější. Nicméně její využití s sebou nese mnoho výhod oproti technologii 24 GHz. Mezi hlavní výhody patří výrazně snazší integrace senzorů do vozidel. Ta je totiž ovlivněna zejména velikostí antény a mmWave technologie umožňuje použití antény malých rozměrů. I s ní však má radar dobré rozlišení úhlů, klíčové pro automobilové systémy. Platí, že 24 GHz radarový senzor vyžaduje přibližně třikrát větší velikost zařízení pro dosažení stejného výkonu.

Další výhodou 77 GHz radarů je fakt, že na rozdíl od 24 GHz technologie umožňují kombinaci vysokého vysílacího výkonu (> -40 dBm/MHz) a velké šířky pásma (>250 MHz). Ta umožňuje radaru pracovat na relativně velké vzdálenosti a současně od sebe dobře oddělovat jednotlivé detekované objekty.

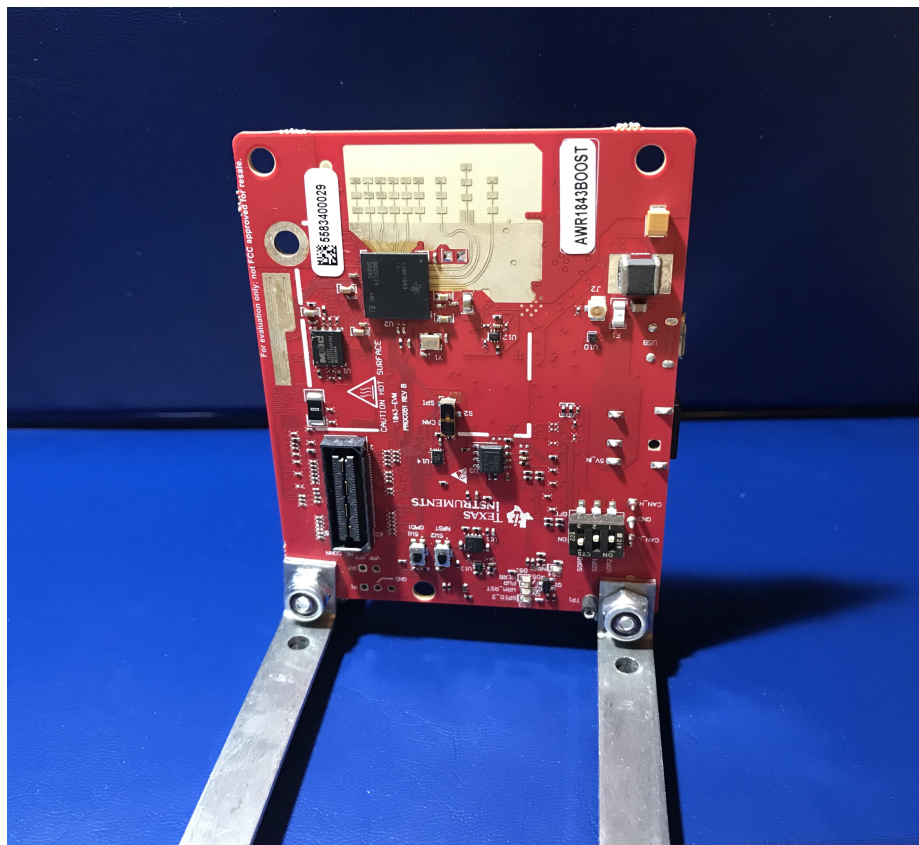
Volba 77 GHz operační frekvence pro milimetrové radary nebyla náhodná. Byla zvolena jednak kvůli tomu, že splňuje technologické požadavky kladené na radar, ale také kvůli institucím starajícím se o regulaci frekvenčního pásma. Pásmo 76-77 GHz je totiž volně dostupné bez regulací téměř po celém světě včetně Spojených států amerických, což je obrovská výhoda pro výrobce těchto zařízení. [7]

3.5 Radarový modul TI AWR1843

V rámci této práce je využíván radarový modul AWR1843 od amerického výrobce polovodičových čipů, společnosti Texas Instruments Inc.¹. Jedná se o integrovaný jednočipový mmWave FMCW radarový senzor schopný pracovat v 76-81 GHz frekvenčním pásmu. AWR1843 je výborným řešením pro radarové systémy v automobilovém průmyslu vyžadující nízkou spotřebu energie a vysokou přesnost měření.

Modul je vytvořen 45-nm RFCMOS procesem, který umožňuje monolitickou implementaci tří-vysílačového a čtyř-přijímačového systému. Nabízí k využití frekvenční pásmo o rozsahu 4 GHz a 2 MB operační paměti. Obsahuje také zabudovaný fázový závěs a analogově-digitální převodník. Taktéž má integrovaný DSP subsystém (*Digital Signal Processing Sub-*

¹<http://www.ti.com/>



Obrázek 3.5: Radarový modul TI AWR1843.

system) pro digitální zpracování radarového signálu. Modul také disponuje zabudovaným procesorovým subsystémem, který je zodpovědný za konfiguraci radaru a kalibraci. Při programování lze využít hardwarového akcelerátoru pro zpracování radarového signálu, zejména pro výpočet rychlých Fourierových transformací.

AWR1843 je nejvyšším modelem řady modulů designovaných pro automobilový průmysl. Lze jej využít pro nejrůznější systémy zvyšující komfort a bezpečnost při řízení, např. jako senzor pro detekci mrtvého úhlu, systém parkovacího asistenta nebo asistenta při změně jízdnicích pruhů. [22].

Kapitola 4

Zpracování radarového signálu

V této kapitole jsou popsány základní operace, jež se provádějí s radarovým signálem. Nejprve bude stručně vysvětlen princip a význam Fourierovy transformace pro digitální zpracování signálu. Následně budou postupně popsány principy měření vzdálenosti, rychlosti a úhlů. Tyto sekce jsou podávány v kontextu mmWave radaru použitého v rámci této práce a popsaného v sekci 3.5. Dále kapitola pojednává o různých režimech vysílání radaru, zmiňuje problém interference signálu a na závěr představuje možný implementační přístup k logice adaptivního tempomatu.

4.1 Fourierovy transformace

Diskrétní Fourierova transformace

Diskrétní Fourierova transformace (dále jako DFT) je jednou z nejběžnějších a nejmocnějších operací na poli digitálního zpracování signálu. Umožňuje analyzovat signál takovým způsobem, jakým to není se spojitým analogovým signálem možné. Jak její název napovídá, pracuje s vzorkovaným diskretním signálem. DFT je matematický postup využívaný k analýze frekvenčních složek obsažených v posloupnosti tvořící diskretní signál. Jinými slovy slouží k transformaci signálu z časové do frekvenční domény. DFT pochopitelně vychází ze základní spojitě Fourierovy transformace $X(f)$. Rovnice pro výpočet DFT má tvar

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi\frac{nm}{N}}, m = [0, N - 1]. \quad (4.1)$$

V rovnici 4.1 značí $x[n]$ diskretní posloupnost vstupních vzorků, e je základ přirozeného logaritmu, j je imaginární složka komplexního signálu, n reprezentuje časový index vstupních vzorků, N pak počet vzorků vstupního signálu a zároveň počet frekvenčních bodů ve výstupu DFT, m značí index vzorku ve frekvenční doméně. Konečně, $X[m]$ je výstupní matematická složka DFT vypočtená jako součet komplexních exponenciál ve frekvenční dimenzi.

Výsledkem Fourierovy transformace je frekvenční spektrum signálu. DFT má také několik zajímavých a důležitých vlastností. Již bez matematických vztahů jsou uvedeny ty nejdůležitější. První z nich je věta o linearitě, kdy platí, že lineární kombinace signálů odpovídá lineární kombinaci jejich spekter. Druhou vlastností je věta o změně měřítka, která říká, že rozšíření signálu v časové oblasti odpovídá zúžení frekvenčního spektra a naopak.

Třetí významná vlastnost je týká posunu signálu v čase. Pokud dojde k posunutí signálu v časové doméně, jeho amplitudové spektrum se nemění a změní se pouze jeho fázové spektrum.

Vstupem DFT může být buď komplexní, nebo reálný signál. Zatímco komplexní vstupní signál má v modulovém spektru pouze jednu frekvenční špičku, reálný signál je symetrický v modulovém spektru (rovnice 4.3) a má opačné fáze v argumentovém spektru (rovnice 4.4). Můžeme říct, že obě poloviny spektra jsou komplexně sdružené podle rovnice 4.2.

$$X[m] = X^*[N - m] \quad (4.2)$$

$$|X[m]| = |X[N - m]| \quad (4.3)$$

$$\arg X[m] = -\arg X[N - m] \quad (4.4)$$

Rychlá Fourierova transformace

Přestože je DFT nejpřímochařejším matematickým postupem k frekvenční analýze v diskrétní posloupnosti, je výpočetně velmi neefektivní. Výpočet DFT podle definičního vztahu 4.1 vyžaduje N^2 komplexních součinů i součtů (N je počet prvků posloupnosti). Vezmeme-li v potaz, že DFT se dnes již běžně provádí nad stovkami nebo tisíci vzorky, nelze s tímto algoritmem vyhovět požadavkům pro zpracování v reálném čase.

S řešením tohoto problému přišli v roce 1965 pánové Cooley a Tukey — vytvořili velice efektivní algoritmus nazvaný rychlá Fourierova transformace (FFT z anglického *Fast Fourier Transformation*). Tento algoritmus redukuje počet komplexních součinů, přičemž podává totožné výsledky jako běžná diskrétní Fourierova transformace. Počet provedených operací je logaritmický, $N \times \log 2N$. Zrychlení spočívá v tom, že N -bodová DFT může být vypočtena jako součet dvou $N/2$ bodových transformací vytvořených ze sudých a lichých vzorků. Rozdělením v každém kroku výpočtu dochází k zásadnímu snížení množství potřebných aritmetických operací. Tato metoda výpočtu FFT se nazývá *radix-2 FFT*. [11]

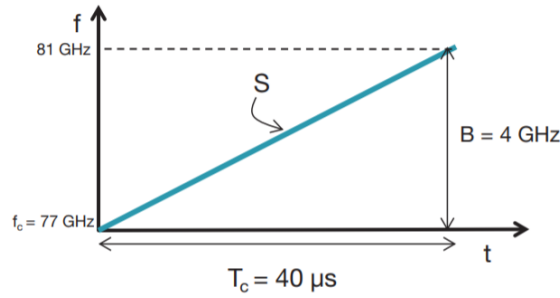
4.2 Měření vzdálenosti

Dříve, než bude vysvětlen způsob měření vzdálenosti objektů radarem, je nutné představit, jaké vlastnosti má vysílaný a přijímaný radarový signál, a také uvést některé pojmy s ním spojené. Tato sekce vychází ze zdrojů [21], [17] a [27].

Jak již bylo uvedeno dříve, radarové systémy vysílají elektromagnetický signál, který se odrazí od objektů v cestě svého šíření. FMCW radary používají signál, jehož frekvence lineárně roste a klesá s časem a má tvar podobný rampě. Tento typ signálu je obvykle nazýván *chirp* signál (v češtině pro něj neexistuje ekvivalentní termín). Jeden takový chirp signálu ukazuje obrázek 4.1.

Chirp je charakterizován počáteční frekvencí f_c , šířkou pásma chirpu B a dobou trvání T_c . Sklon chirpu S pak zachycuje rychlost změny frekvence.

FMCW radar kontinuálně vysílá chirp signál a zachycuje odražené signály. Oba dva pak společně vstupují do mixéru, který je zkombinuje dohromady a vyrobí z nich signál střední



Obrázek 4.1: Chirp signál s frekvencí jako funkcí času. Zdroj [21].

frekvence, zvaný *IF signál* (z anglického *Intermediate frequency signal*). V našem případě mixér vytvoří ze vstupních sinusových signálů popsaných rovnicemi

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (4.5)$$

$$x_2 = \sin(\omega_2 t + \phi_2) \quad (4.6)$$

výsledný signál x_{out} , který má frekvenci rovnou rozdílu frekvencí vstupních signálů 4.5 a 4.6. Podobně pak jeho fáze je rovna rozdílu těchto signálů, jak je vidět v rovnici 4.7.

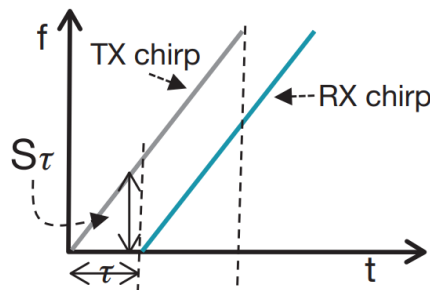
$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (4.7)$$

Měření vzdálenosti jednoho detekovaného objektu

Nyní již lze přistoupit k samotnému procesu měření vzdálenosti. Podle rovnice 4.8 lze odvodit časové zpoždění jako:

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (4.8)$$

kde d je vzdálenost k detekovanému objektu a c je rychlost světla. Pro získání závislosti frekvence IF signálu na výstupu z mixéru na čase je nutné odečíst od sebe vyslaný (*TX*) a přijatý *RX* signál, viz obrázek 4.2. Protože oba signály jsou stejné, pouze zpožděné o čas τ , je jejich vzdálenost fixní. To znamená, že jejich odečtením je získána konstantní frekvence IF signálu. Velikost této frekvence je na obrázku 4.2 znázorněna proměnou S_τ . Platí také, že tato frekvence je platná pouze v časovém intervalu, ve kterém se oba chirpy překrývají (na obrázku se jedná o prostor mezi svislými přerušovanými čarami).



Obrázek 4.2: Zpoždění vyslaného (*TX*) a přijatého (*RX*) signálu. Zobrazen jeden konkrétní chirp. Zdroj [21].

Z rovnice 4.7 vyplývá, že signálem vystupujícím z mixéru je sinová vlna. Zároveň bylo dokázáno, že frekvence IF signálu je konstantní, a proto má i sinová vlna vystupující z mixéru konstantní frekvenci.

Počáteční fáze ϕ_0 odpovídá rozdílu mezi fázemi přijatého a vyslaného chirpu přesně v čase začátku IF signálu:

$$\phi_0 = 2\pi f_c \tau \quad (4.9)$$

Zkombinováním rovnic 4.8 a 4.9 se odvodí vztah

$$\phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (4.10)$$

kde λ je vlnová délka signálu.

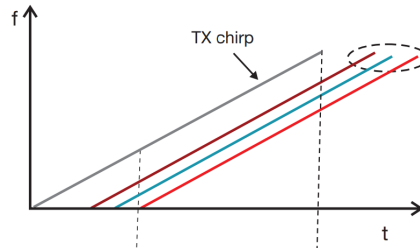
Celkově pak získáme pro objekt ve vzdálenosti d od radaru, je-li IF signál sinová vlna, rovnici:

$$A \sin(2\pi f_0 t + \phi_0) \quad (4.11)$$

kde $f_0 = \frac{S2d}{c}$ a $\phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda}$.

Měření vzdálenosti několika detekovaných objektů

Metoda určení vzdálenosti popsaná v podkapitole 4.2 předpokládá pouze jeden objekt detekovaný radarem. Pro úplnost je v této podsececi popsáno, jak se metoda změní v případě měření vzdálenosti několika objektů detekovaných současně.



Obrázek 4.3: Zpoždění vyslaného (*TX*) a přijatých chirpů. V tomto případě byly detekovány tři různé objekty v různých vzdálenostech. Zdroj [21].

Obrázek 4.3 ukazuje situaci, kdy po vyslání chirpu byly přijaty tři různé chirpy, každý s jiným zpožděním. Zpoždění jednotlivých přijatých chirpů je přímo úměrné vzdálenosti objektů, od nichž byly odraženy. Stále však platí, že odečtením jednotlivých chirpů od vyslaného chirpu jsou získány konstantní frekvence IF signálů. Sinová vlna na výstupu mixéru však v tomto případě nemá pouze jednu konstantní frekvenci, na její výsledné frekvenci se podílí všechny složky přijatého signálu.

Aby bylo možné od sebe rozlišit jednotlivé frekvenční složky, je nutné provést Fourierovu transformaci. Jejím výstupem je frekvenční spektrum, ve kterém má každá frekvenční složka signálu svůj vrchol (anglicky označován termínem *peak*). A tedy každý vrchol označuje přítomnost objektu v konkrétní vzdálenosti.

Rozlišení vzdálenosti

Závěr této sekce pojednává o rozlišení vzdáleností radaru. Rozlišení je schopnost radaru rozeznat od sebe dva nebo více objektů. Pokud se k sobě objekty přibližují, od určitého okamžiku je již radar není schopen rozlišit a považuje je za jeden objekt.

Teorie Fourierovy transformace uvádí, že lze dosáhnout zvýšení rozlišení ve frekvenčním spektru prodloužením délky IF signálu. Aby však bylo možné zvýšit délku IF signálu, musí být také úměrně zvětšena šířka pásma. Při zvětšování šířky pásma ještě musí být přihlédnuto k faktu, že IF signál je obvykle digitalizován pro následné zpracování, např. jednotkou DSP. Proto je šířka pásma limitována vzorkovací frekvencí F_s , která musí splňovat nerovnost 4.12

$$F_s \geq \frac{S2d_{max}}{c} \quad (4.12)$$

kde d_{max} je maximální dosah radaru.

Teorie Fourierovy transformace také dává do souvislosti frekvenční rozlišení a délku pozorovacího okna T . Uvádí, že frekvence dvou IF signálů lze rozlišit, pokud jejich frekvenční rozdíl splňuje nerovnost 4.13:

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \quad (4.13)$$

kde T_c je délka pozorovacího intervalu.

Protože $\Delta f = \frac{S2\Delta d}{c}$, lze rovnici 4.13 vyjádřit jako $\Delta d > \frac{c}{2ST_c} = \frac{c}{2B}$ ($B = ST_c$).

Na základě této úvahy je vidět, že rozdíl vzdáleností (tedy rozlišení) d_{res} závisí pouze na šířce pásma, v níž operují chirpy:

$$d_{res} = \frac{c}{2B} \quad (4.14)$$

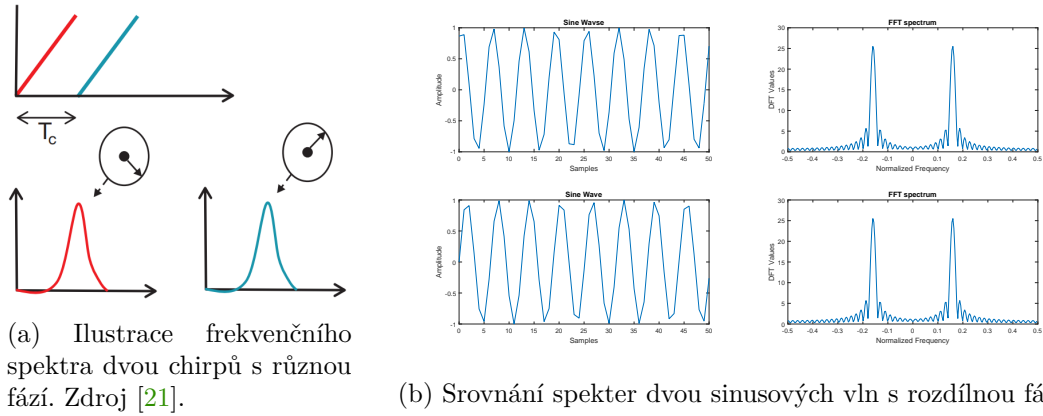
Z rovnice 4.14 lze odvodit, že mmWave FMCW radar s šířkou pásma několik GHz dokáže od sebe rozlišovat objekty v řádu centimetrů. Dále z výše uvedených poznatků lze odvodit, že platí následující dvě přímé úměrnosti – čím větší je šířka pásma chirpu B , tím lepšího rozlišení lze dosáhnout, a čím větší je šířka pásma IF signálu, tím má radar větší maximální dosah.

4.3 Měření rychlosti

Následující sekce vysvětlí základní principy měření rychlosti pomocí FMCW radarů. Opět je rozdělena na podsektory týkající se nejprve měření rychlosti jednoho detekovaného objektu, následně dvou a více objektů. Na závěr je zmíněno určování rozlišení v rychlostní doméně. V této sekci je využita fázorová notace (vzdálenost, úhel) komplexních čísel. Informace vycházejí ze zdrojů [21] a [17].

Měření rychlosti jednoho detekovaného objektu

Aby byl FMCW radar schopný změřit relativní rychlost vozidla, musí vyslat dva oddělené chirpy. Čas jejich vyslání je posunut o hodnotu T_c . Oba chirpy jsou pak odrazeny stejným objektem a přijaty radarem, opět však s časovým rozdílem. Následně jsou oba zpracovány (rychlou) Fourierovou transformací (běžně označována jako *range-FFT*) a na jejím základě je možné získat vzdálenost daného objektu (viz sekce 4.2). Frekvenční spektrum každého chirpu má vrcholy na stejné pozici, ale každý z nich má jinou fázi. Ilustrace této situace



Obrázek 4.4: Ilustrace frekvenčního spektra chirpů a porovnání spekter dvou signálů s různou fází.

se nachází na obrázku 4.4a, důkaz stejné polohy vrcholů pak na grafu 4.4b. Tento fázový rozdíl ve spektrech jednotlivých chirpů odpovídá pohybu objektu.

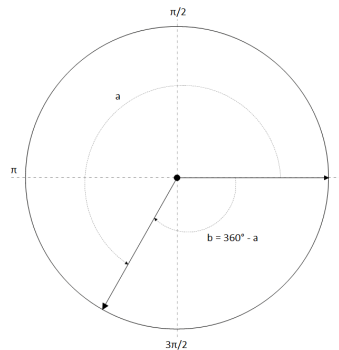
Počáteční fáze signálu již byla diskutována v rovnici 4.10. Z ní lze odvodit fázový rozdíl dvou chirpů:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda} \quad (4.15)$$

Z rovnice 4.15 pak lze snadnou matematickou úpravou získat vztah pro výpočet rychlosti objektu:

$$v = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi T_c} \quad (4.16)$$

Z rovnice 4.16 vyplývá, že pokud je fázový rozdíl kladný, objekt se pohybuje směrem od radaru a naopak. Jelikož je rychlost objektu odvozována z fázového rozdílu, může dojít k situaci, kdy je rychlost objektu příliš vysoká a dojde k nejednoznačnosti při určování rychlosti. Tuto situaci demonstruje fázor 4.5. V nastíněné situaci bez jakýchkoliv omezení nelze rozhodnout, zda fáze odpovídá velmi rychlému pohybu objektu od radaru (ve fázoru znázorněno písmenem *a*), nebo pomalejšímu pohybu objektu směrem k radaru (znázorněno písmenem *b*). Proto je nutné zavést omezující podmínku, jejíž splnění zajišťuje jednoznačné měření: $|\Delta\phi| < \pi$.



Obrázek 4.5: Příklad nejednoznačnosti reprodukce fázového posunu signálu.

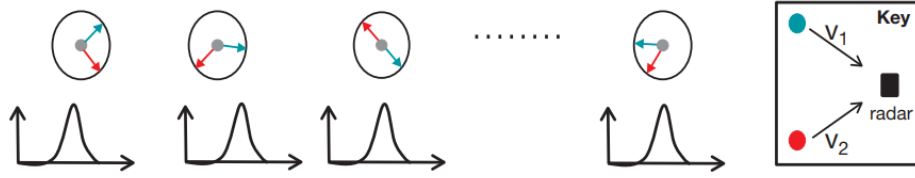
Úpravou rovnice 4.16 s přihlédnutím k podmínce jednoznačnosti měření vznikne vztah definující maximální jednoznačně měřitelnou relativní rychlost v_{max} objektu vzhledem k radaru:

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (4.17)$$

Měření rychlosti několika objektů ve stejné vzdálenosti

Metoda měření relativní rychlosti popsaná v předchozí podsekcí 4.3 není funkční v případě, kdy radar detekuje více objektů ve stejné vzdálenosti pohybujících se různou rychlostí. Protože se objekty nacházejí ve stejné vzdálenosti, odrazí chirpy, které vygenerují identické IF frekvence. Navíc výsledkem *range-FFT* je v takovém případě spektrum, které má pouze jeden vrchol reprezentující kombinovaný signál ze všech objektů v dané vzdálenosti.

Aby byl radar schopný rozlišit a změřit relativní rychlosti i v této situaci, musí vyslat více než dva chirpy. Vysílá tedy množinu N stejně oddělených chirpů zvanou chirp rámeček (originálně *chirp frame*). Zpracování tohoto rámce pomocí *range-FFT* vede k množině N stejně umístěných vrcholů ve frekvenčním spektru. Každý vrchol z této množiny ovšem má rozdílnou fázi, která je složena z fází signálů odražených od jednotlivých objektů. Tato situace je ilustrována na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Provedením *Range-FFT* odraženého rámce chirpů vznikne N různých fázorů. Modelová situace pro dva objekty ve stejné vzdálenosti od radaru. Červené a modré fázory odpovídají fázím signálu odraženého od odpovídajícího objektu. Zdroj [21]

Nad vzniklou množinou fázorů pak lze provést další Fourierovu transformaci, běžně označovanou jako *Doppler-FFT*. Vzniklé nové frekvenční spektrum již rozlišuje fázové rozdíly signálů mezi po sobě jdoucími chirpy vzniklé odrazem od jednotlivých objektů. A díky této informaci již lze vypočítat aktuální relativní rychlost jednotlivých objektů dosazením do vztahu 4.16.

Rozlišení v rychlostní doméně

Rozlišení rychlosti radaru odpovídá nejmenšímu možnému oddělení rychlostí dvou objektů ve stejné vzdálenosti od radaru. Fakticky jej tedy ovlivňuje schopnost rozlišit dvě různé frekvence ve spektru po provedení *Doppler-FFT*. Teorie diskrétní Fourierovy transformace říká, že dvě diskrétní frekvence ω_1 a ω_2 mohou být od sebe odlišeny, pokud platí:

$$\Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2| > \frac{2\pi}{N} \text{ rad/vzorek} \quad (4.18)$$

Protože $\Delta\omega$ je také definována rovnicí 4.15, lze matematicky odvodit rychlostní rozlišení v_{res} jako:

$$v_{res} > \frac{\lambda}{2NT_c} \quad (4.19)$$

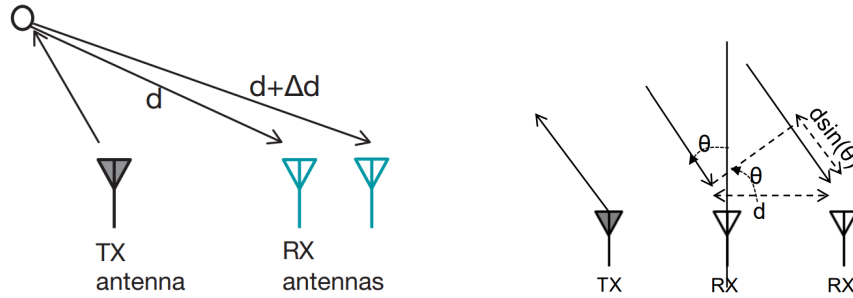
4.4 Detekce úhlů

Měření vzdálenosti a rychlosti jsou přirozené silné stránky radarových systémů. Kromě toho radary umožňují také měřit úhly, v jakých se detekované objekty vzhledem k radaru nacházejí. O principu určování úhlů pojednává tato sekce, vycházející ze zdrojů [21] a [17].

Měření úhlu jednoho detekovaného objektu

FMCW radarové systémy jsou schopné určit úhel v horizontální rovině, pod nímž byl odražen signál od detekovaného objektu. Tento úhel je nazýván úhel návratu (anglicky *Angle of Arrival*). Aby byl radar schopný detekovat úhly, musí využívat alespoň dvě přijímací antény. Metoda určení úhlu je založená na předpokladu, že malá změna ve vzdálenosti objektu vede k fázové změně vrcholu ve frekvenčním spektru po provedení *range-FFT* nebo *Doppler-FFT*.

Využívá-li radar dvě přijímací antény, které jsou od sebe vzdálené o vzdálenost l , rozdíl vzdáleností objektu od každé antény způsobí změnu fáze vrcholu ve spektru. Tato situace je ilustrována na obrázku 4.7a.



(a) Ilustrace různé vzdálenosti objektů (b) Geometrické znázornění určování úhlu k jednotlivým přijímacím (RX) anténám. zdroj [17].
Zdroj [21].

Obrázek 4.7: Ilustrace radarového systému v konfiguraci se dvěma přijímacími anténami.

V této konfiguraci antén odpovídá změna fáze vztahu v rovnici 4.20:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}. \quad (4.20)$$

Při využití běžné planární geometrie platí, že $\Delta d = l \sin(\Phi)$, kde l je vzdálenost mezi anténami. Proto lze vypočítat úhel návratu Φ na základě měření $\Delta\phi$ jako:

$$\Phi = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi l} \right) \quad (4.21)$$

Důležitou informací při určování úhlu návratu je nelineární závislost $\Delta\phi$ na $\sin(\Phi)$. Funkci $\sin(\Phi)$ lze aproximovat s lineární funkcí, avšak pouze když má Φ malou hodnotu. Tato vlastnost ovlivňuje přesnost úhlového měření – čím menší je hodnota Φ , tím přesněji je úhel návratu radarem změřen. Pokud se například úhel blíží hodnotě 90° , je přesnost měření velmi degradována, až na nulovou hodnotu.

Měření úhlů více objektů

Pokud dojde k situaci, ve které radar měří úhly několika současně detekovaných objektů, které jsou ve stejné vzdálenosti od radaru a pohybují se totožnou relativní rychlostí, uvedený přístup k určení úhlu návratu není funkční. Jedná se v podstatě o stejný problém, který nastal při měření relativních rychlostí objektů ve stejné vzdálenosti, popsané v sekci 4.3.

V případě určování úhlů je řešením využití pole N přijímacích antén. Provedením další Fourierovy transformace nad sekvencí fázorů pocházejících z jednotlivých přijímacích antén dojde k rozlišení frekvenčních složek a na jejich základě pak již lze vypočítat úhly návratu jednotlivých detekovaných objektů dosazením do vztahu 4.21. Tato Fourierova transformace se běžně označuje jako *angle-FFT*.

Maximální úhlový rozsah radaru

Stejně jako má rozlišení při měření rychlosti své limity, má je i určování úhlu. Maximální úhlový rozsah radaru je definován maximálním úhlem návratu, který může radar změřit. Úhly, stejně jako rychlosti, jsou měřeny na základě fázových posunů, a proto se i na jejich určování vztahuje možná nejednoznačnost ilustrovaná fázorem 4.5. Z toho vyplývá, že jednoznačné měření úhlu vyžaduje $|\Delta\omega| < 180^\circ$, což s využitím rovnice 4.21 odpovídá vztahu:

$$\frac{2\pi l \sin(\Phi)}{\lambda} < \pi \quad (4.22)$$

Konečně, maximální úhlový rozsah, který dokážou dvě oddělené přijímací antény poskytnout, je:

$$\Phi_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2l} \right) \quad (4.23)$$

Ze vztahu 4.23 vyplývá, že nejširšího zorného pole $\pm 90^\circ$ radar dosáhne, pokud jsou od sebe jednotlivé přijímací antény vzdáleny o délku $\frac{\lambda}{2}$.

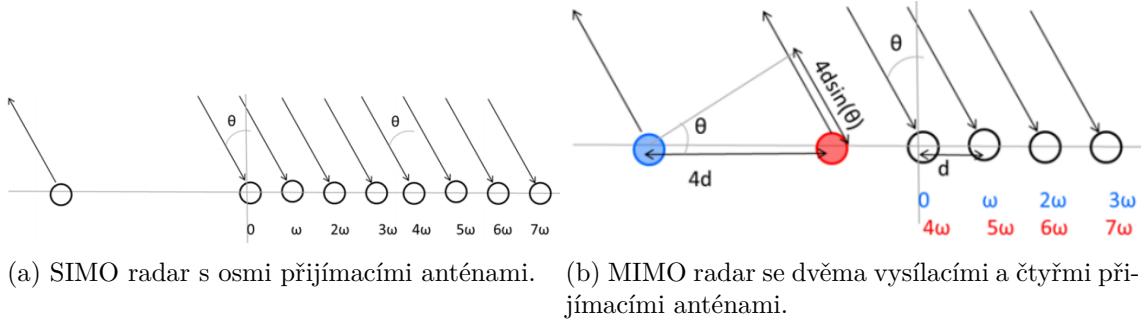
Určování úhlů u většiny radarů nepatří k nejsilnějším stránkám, protože pro přesné měření vyžaduje co nejvíce přijímacích antén. Aktuální trendy v designu radarových čipů však preferují co nejkompatnější rozměry, což se neslučuje s mnoha integrovanými anténami. Zároveň více antén také zvyšuje cenu radaru.

4.5 MIMO princip, beamforming

V této sekci jsou popsány dva principy, které slouží ke zlepšení různých detekčních vlastností radaru. Nejprve bude zmíněn princip MIMO, v druhé části pak metoda beamforming. Sekce vychází ze zdrojů [16] a [24].

Sekce 4.4 týkající se detekce úhlu radarem popisuje princip měření pomocí jedné vysílací a dvou přijímacích antén. Obecně platí, že zvyšováním počtu přijímacích antén dochází ke zlepšování úhlového rozlišení radaru. Radary mající jednu vysílací a více přijímacích antén jsou souhrnně označovány zkratkou SIMO (z anglického výrazu *Single-input-multiple-output*). Například SIMO radarové zařízení se čtyřmi přijímacími anténami disponuje úhlovým rozlišením okolo 30° , zatímco zařízení s osmi anténami má rozlišení 15° . Tento přístup zvyšování počtu přijímacích antén má však své limity, protože každá anténa navíc vyžaduje vlastní oddělený řetězec zpracování přijatého signálu na zařízení, což vede ke zvyšování ceny zařízení a větší velikosti čipu.

Alternativním přístupem ke zlepšení úhlového rozlišení je princip MIMO (z anglického Multiple-input-multiple-output). Jak název napovídá, tento radar využívá několik vysílacích i přijímacích antén. Díky tomu lze s pomocí N_{TX} vysílacích a N_{RX} přijímacích antén, metodou diskutovanou níže dosáhnout úhlového rozlišení ekvivalentnímu SIMO radaru s počtem $N_{TX} \times N_{RX}$ přijímacích antén. Příklad a porovnání této situace je ilustrován na obrázcích 4.8. MIMO radar tedy poskytuje efektivní zlepšení úhlového rozlišení vzhledem k nákladům.



Obrázek 4.8: Porovnání SIMO a MIMO radarových systémů, které mají ekvivalentní úhlové rozlišení. Zdroj obrázků [16].

Detekce úhlu SIMO radarem na obrázku 4.8a se je popsána v již zmíněné sekci 4.4. Oproti tomu MIMO radar na obrázku 4.8b potřebuje pro dosažení stejného úhlového rozlišení celkem o 3 antény méně. Vysílací anténa TX_1 (na obrázku modře) vysílá signál, který po přijetí jednotlivými přijímacími anténami má fáze popořadě $0, \omega, 2\omega, 3\omega, \dots$. Protože druhá vysílací anténa TX_2 (na obrázku červeně) je umístěna ve vzdálenosti $4d$ od antény TX_1 , musí signál vyslaný TX_2 navíc urazit ještě cestu o délce $4d \sin(\theta)$ ve srovnání se signálem vyslaným TX_1 . Proto TX_2 signál na přijímacích anténách obsahuje další fázový posun o velikosti 4ω oproti signálu TX_1 . Tedy, fáze signálu od TX_2 na jednotlivých přijímacích anténách mají hodnoty popořadě $4\omega, 5\omega, 6\omega, 7\omega$. Spojením obou přijatých signálů každou přijímací anténou je změřena totožná sekvence fázových posunů, jakou by v dané situaci změřil SIMO radar v konfiguraci jedné vysílací a osmi přijímacích antén. MIMO radar v konfiguraci dvou vysílacích a čtyř přijímacích antén vytvořil virtuální pole osmi přijímacích antén.

Pro zobecnění výše popsané konkrétní situace lze říci, že MIMO radar s N_{TX} vysílacími a N_{RX} přijímacími anténami s jejich vhodným umístěním vygeneruje virtuální pole antén o velikosti $N_{TX} \times N_{RX}$.

V souvislosti se zlepšením úhlového měření a zároveň i měření vzdálenosti radarem je třeba zmínit také techniku zvanou *beamforming*. Jeho konceptem je současné a koherentní vysílání několika vysílacích kanálů, čímž lze dosáhnout vyššího vysílacího výkonu v daném směru, a tedy delší detekovatelné vzdálenosti a zároveň zaměřenějšího zorného pole radaru. Metodu si lze představit jako postupné skenování prostoru po menších částech a následné složení celé scény dohromady z dílčích částí.

Každý vysílací kanál (anténa) v módu beamforming musí být schopen programově nakonfigurovat různé hodnoty fáze a amplitudy signálu na základě toho, kam má hlavní vysílací paprsek směřovat. Fáze vysílaného signálu všech vysílačů se cyklicky mění o daný úhel, čímž v podstatě dochází k natáčení antény do daného směru. Díky koherenci mezi vysílacími kanály je dosaženo většího zisku antény, a tedy mnohem delší detekovatelné vzdálenosti než při použití MIMO módu. Zároveň použití této techniky vede k užšímu zornému poli.

4.6 Interference radarových signálů

Interference mezi různými radary může velmi negativně ovlivňovat funkcionalitu radaru a vést k chybným detekcím objektů a slepým místům v prostoru. Robustní a spolehlivý radarový systém proto musí disponovat metodami pro identifikaci a odstranění nebo alespoň zmírnění interference signálů. Sekce vychází z dokumentu [29].

Nejprve definujeme dva termíny, na nichž jsou následující úvahy postaveny – oběť a agresor. Oběť je radarové zařízení, jehož přijímač je ovlivněn interferencí. Agresor je radarové zařízení, jehož vysílání ovlivňuje přijímač oběti. Důležitou vlastností interference mezi radary je fakt, že efekt ztráty signálu způsobený vzdáleností je slabší pro interferující signál než pro signál odražený od cílů. Jinými slovy interference dominuje v přijatém signálu i v případech, že se nachází v mnohem větší vzdálenosti od oběti než legitimní cíle.

Rozlišují se dva hlavní typy interferencí – křížová a paralelní.

Křížová interference

Křížová interference (anglicky *Crossing Interference*) může nastat, pokud mají chirpy signálu oběti i agresora jiný sklon a mohou se zkřížit. Když dojde ke zkřížení signálů, oběť pozoruje interferenci, protože se smíchaly vyslané signály oběti i agresora. Energie agresora je však pro oběť viditelná pouze tehdy, když rozdíl jejich frekvencí spadá do šířky pásma oběti.

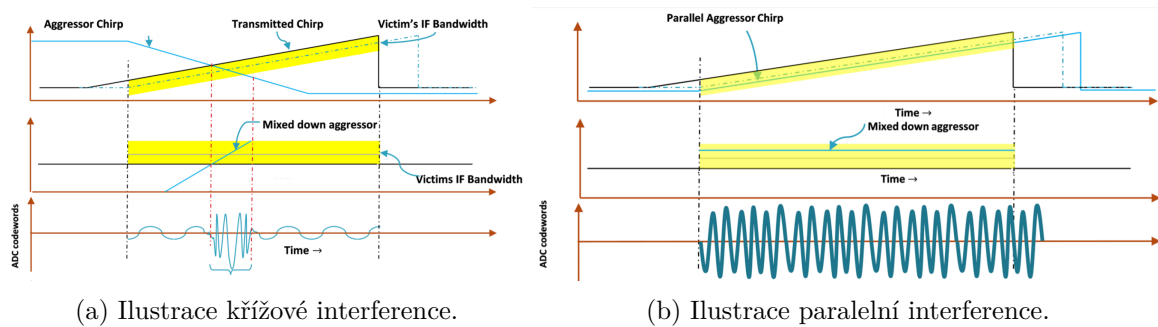
Příklad této situace lze vidět na obrázku 4.9a. Chirp oběti má lineární rostoucí průběh, zatímco chirp agresora lineárně sestupný průběh. Oba signály se zkříží ve střední části chirpu (na obrázku ohraničeno červenými čerchovanými čarami) a ovlivňují se po dobu, kdy frekvence obou signálů spadá do frekvenčního pásma oběti (označeno žlutou barvou). Jak lze vidět na spodním grafu, harmonický frekvenční průběh je v oblasti interference značně narušen. Interference navíc zvýší práh šumu a zároveň snižuje poměr signálu k šumu SNR silných objektů a úplně pohřbí slabé objekty.

Paralelní interference

Pokud mají chirpy signálu oběti i agresora totožný sklon, interference se může objevit pouze v případech, kdy čas mezi začátkem chirpu oběti a chirpu agresora tak malý, že frekvence chirpu agresora spadá do frekvenčního pásma chirpu oběti. Tento typ interference je nazýván paralelní.

Ilustrace vzniku a následků paralelní interference je vidět na obrázku 4.9b. Chirp agresora je zde přesnou kopií chirpu oběti, pouze zpožděný o velmi malý časový interval. Jak je vidět na spodním grafu, smícháním obou chirpů vznikne konstantní frekvenční složka. Po provedení Fourierovy transformace se ve frekvenčním spektru tato složka objeví, je chybně reprodukována a stane se z ní falešný objekt v náhodné vzdálenosti a s náhodnou rychlostí. Je také vidět, že oblast postižená paralelní interferencí odpovídá délce prakticky celého chirpu.

Nicméně pravděpodobnost vzniku paralelní interference je velmi malá a reálně může vzniknout pouze tehdy, když dva totožně nastavené radary začnou současně vysílat neda-leko sebe. Navíc pokud mají oběť i agresor nezávislé lokální oscilátory, je téměř nemožné jimi nakonfigurovat stejnou konfiguraci chirpů. V tomto případě nedochází ke vzniku falešných objektů, spíše se objevuje mnohem více šumu ve frekvenčním spektru, díky čemuž lze interferenci detekovat.



Obrázek 4.9: Ilustrace paralelní a křížové interference. Zdroj obrázků [29].

Metody řešení interference

Interference radarových signálů je vždy nechtěná a je nutné ji řešit. V této části jsou stručně uvedeny některé metody přispívající k vyhnutí se nebo alespoň zmírnění vlivu interference.

Zamezení interference

První metodou zamezující vzniku interference je *standardizace*. Její podstata spočívá ve frekvenčním a časovém plánování chirpů. Pod frekvenčním plánováním je myšleno rozdělení frekvenčního pásma na několik disjunktních oblastí, v nichž jednotlivé radary operují a jejich frekvence se proto neovlivňují. Princip časového plánování je založen na předpokladu, že obvykle existuje časový interval mezi jednotlivými rámci, v němž není vyslán žádný signál. Lze tedy vysílání jednotlivých radarů naplánovat tak, aby se jejich vysílací cykly vzájemně nepřekrývaly a nezpůsobovaly interference. Výhodou této metody je její snadná implementace.

Další metodou je různý startovací čas vysílání rámců řešící problém paralelní interference. Pokud jsou například radary od jednoho výrobce synchronizovány stejnými hodinami a nakonfigurovány stejně, může docházet ke vzniku paralelní interference. Avšak pokud rámec každého radaru má určitý ofset, nedochází k paralelní interferenci a takové radary mohou operovat současně. Tato metoda může být implementována například využitím operačního módu master/slave.

I v případě absence jakékoliv synchronizace mezi radary je stále možné provést detekci a vyhnutí se interferenci. Tato metoda ještě před tím, než zařízení začne vysílat, zanalyzuje frekvenční spektrum okolních signálů. Toho dosáhne vypnutím vysílačích a zapnutím pouze přijímacích antén, které tak přijímají pouze signály vyslané jinými zařízeními. Pokud žádné jiné zařízení nevysílá, je přijaté frekvenční spektrum čisté. Naopak pokud jiné zařízení vysílá interferenční signál, ve spektru se objeví špičky v oblastech, kde bude docházet k interferencím. Díky této spektrální analýze je pak možné nalézt volné části spektra nebo časové sloty, v nichž je možné operovat bez interferencí.

Lokalizace a zmírnění interference

V mnoha případech je nemožné zamezit křížové interferenci. Je tedy nutné ji alespoň lokalizovat a zmírnit.

Jednou z možných metod lokalizace křížových interferencí je nalezení odlehlých hodnot. Silná interference se projevuje jako velká anomálie v analogových datech. Nastavením

vhodného prahu lze tyto odchylky lokalizovat a označit odpovídající chirpy jako ovlivněné interferencí.

Další možností je využití metrik kvality chirpu, které lze volitelně připojit ke každému chirpu. Využitím různých pokročilých vlastností radaru ve spolupráci s metrikami kvality lze získat informace o interferenci. Tento způsob lokalizace interference využívá použitý radar TI AWR1843.

Po lokalizaci oblasti interference lze přistoupit k jejímu zmírnění, což odpovídá opravě dané oblasti. Nejjednodušší metodou je nahrazení celé interferenční oblasti nulami. Ovšem tento přístup má vedlejší efekt vytváření velkých postranních vrcholů ve frekvenčním spektru, které mohou zamaskovat slabší objekty. Lepším přístupem je použití vyhlazovacího okna, které vynuluje pouze vzorky, které jsou ovlivněny interferencí. Použití okna vede ke vzniku menších postranních vrcholů a tedy lepší detekci slabých objektů.

Ještě lepším přístupem je provedení lineární interpolace v ovlivněné oblasti použitím posledního dobrého vzorku před interferencí a prvního dobrého vzorku po interferenci. Tento přístup funguje velmi dobře ve většině případů.

4.7 Logika adaptivního tempomatu

Adaptivní tempomat v zásadě operuje ve dvou režimech. Prvním režimem je mód kontroly rychlosti, který je využíván, pokud se před vozidlem nenacházejí žádné překážky. Druhým režimem je mód kontroly vzdálenosti, uplatňující se v situaci, kdy před sebou vozidlo nalezne nějakou překážku.

Mód kontroly rychlosti je poměrně přímočarý – jediným úkolem systému je nastavit a držet řidičem zvolenou rychlost jízdy. Ve fyzické implementaci jsou využity další systémy starající se o ovládání plynu a brzdy.

Druhý režim, kontrola vzdálenosti, je výrazně komplikovanější. V tomto případě musí systém, potažmo vozidlo, přizpůsobovat svoji rychlost na základě rychlosti vpředu jedoucího vozidla. Cílem tempomatu je neustále udržovat minimálně danou bezpečnou vzdálenost od vozidla vpředu.

Autoři článku [14], který je zároveň hlavním zdrojem informací v této sekci, navrhli pro problém určení správné reakce algoritmus využívající fuzzy logiku. Jejím vstupem jsou vzdálenost a relativní rychlost mezi hostitelským vozidlem a překážkou. Vzdálenost objektu však není absolutní, ale je relativní vzhledem k požadované vzdálenosti, kterou by mezi sebou měla vozidla udržovat. Výstupní proměnnou je reakce systému (tedy příkaz pro ovládání brzd nebo plynu podle poměru reálné rychlosti vozidla a překážky).

V této vědecké práci autoři zvolili lichoběžníkové a trojúhelníkové tvary členských funkcí pro oba vstupy. Každá vstupní proměnná obsahuje sedm lingvistických proměnných. Významy obou vstupních proměnných jsou následující: záporná velká (NL), záporná střední (NM), záporná malá (NS), nula (Z), kladná malá (PS), kladná střední (PM) a kladná velká (PL). Členské funkce výstupu jsou rozděleny na dvě strany – záporná část reprezentuje příkaz k brzdění, kladná část reprezentuje příkaz ke zrychlení.

Fuzzy pravidla adaptivního tempomatu jsou kolekcí lingvistických proměnných. Příklad takového fuzzy pravidla následuje:

If vzdálenost je záporná střední **and** relativní rychlost je záporná střední **then** příkaz je záporná velká.

	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	NVL	NVL	NVL	NL	NM	NS	NS
NM	NVL	NL	NM	NM	NS	NS	Z
NS	NL	NM	NS	NS	NS	Z	Z
Z	NM	NS	Z	NS	Z	PS	PS
PS	NS	Z	Z	Z	Z	PM	PL
PM	NS	Z	Z	PS	PM	PL	PVL
PL	NS	Z	Z	PS	PL	PVL	PVL

Tabulka 4.1: Fuzzy pravidla pro systém adaptivního tempomatu. Sloupce značí hodnoty vstupní proměnné vzdálenost, řádky hodnoty relativní rychlost. Převzato z [14].

Obě vstupní proměnné byly asociovány s devíti hodnotami výstupu (mezi výstupní hodnoty patří mimo výše zmíněné ještě hodnoty záporná hodně velká (NVL) a kladná hodně velká (PVL). Celkem vzniklo 49 pravidel, která jsou zobrazena v tabulce 4.1.

Na jejich základě je pak fuzzy interferenčním systémem vypočtena výstupní členská funkce. Defuzzifikační metodou je vážený průměr výstupů ze všech pravidel, váhou je síla daného pravidla.

Kapitola 5

Návrh řešení, datová sada

Následující kapitola je zaměřena na popis návrhu řešení s využitím dostupných prostředků a plán práce. Je zde také popsán formát dat, s jejichž využitím probíhala implementace.

5.1 Detailní specifikace zadání

Cílem této závěrečné práce je seznámení se s radarovým senzorem TI AWR1843 a jeho využití při implementaci systému adaptivního tempomatu. Součástí práce je důkladné vyhodnocení kvality a spolehlivosti systému a jeho porovnání s jiným radarovým senzorem KMC-4 od firmy RFBeam Microwave, s nímž má autor zkušenost z předchozí práce. V rámci práce je také nutné nasbírat komplexní datovou sadu, nad níž bude probíhat vývoj systému, jeho testování a demonstrace výsledků. Navíc bude systém funkční i v reálném čase. Pro demonstrační účely pak budou pořízeny odpovídající videozáznamy. Výstupem práce bude grafické rozhraní demonstrující funkcionality systému a poznatky z testování uvedené v kapitole 7.

5.2 Plán práce

Řešení této práce lze v podstatě rozdělit na pět hlavních fází. První fáze se skládala ze seznámení se s poskytnutým radarovým modulem AWR1843 od výrobce Texas Instruments Inc., jeho softwarovými vývojovými nástroji a s některými již implementovanými demo aplikacemi využívající tento modul. Po poradě s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že implementace senzoru adaptivního tempomatu s využitím radaru AWR1843 bude postavena na demo aplikaci *Medium Range Radar*¹. Tato aplikace má již ve svém základu vhodné parametry pro využití v rámci této práce. Konkrétně se jedná o maximální detekovatelnou vzdálenost až 150 metrů a maximální detekovatelnou relativní rychlost mající hodnotu až 150 km/h. Zároveň v této fázi proběhlo nastudování různých metod a principů, které byly dále využity v rámci implementace.

V druhé fázi došlo k vytvoření datové sady, s jejímž využitím pak probíhala implementace. Více informací týkající se dat lze nalézt v sekci 5.3 a 7.2.

Třetí fáze se pak sestávala z implementace prototypu. Byl implementován navržený systém, popsáný v podsekcí 5.4 v jazyce Python. Obecný základ aplikace byl poskytnut vedoucím práce a umožňoval zpracování výstupních dat z různých radarových modulů od Texas Instruments z modelových řad IWR (*Industrial mmWave sensors*) i AWR (*Automotive*

¹http://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A0bI15yAPR-DjIwxgdgyuA__AocYeEd__LATEST

mmWave sensors). Zároveň také poskytoval možnost vizualizace dat s využitím vizualizační knihovny Matplotlib. V průběhu implementace byly výsledky průběžně ověřovány na vytvořené datové sadě.

Čtvrtou fází pak byla implementace systému adaptivního tempomatu jako firmwaru radarového modulu. Obě funkční jednotky MSS (*Master Subsystem*) a DSP (*Digital Signal Processign Subsystem*) jsou implementovány v jazyce C. K vizualizaci výstupu je opět využit prototyp implementovaný v Pythonu.

Pátou a poslední fází pak bylo komplexní testování implementovaných systémů přímo v silničním provozu. Výsledky testování jsou diskutovány v samostatné kapitole 7.

5.3 Formát dat

Formát výstupních dat z radarového modulu v rámci demo aplikace *Medium Range Radar* (dále jako *MMR*) je popsán v dokumentaci [23]. Jednotlivé datové pakety jsou zakódovány prostřednictvím obecného formátu dat *TLV* (*type/tag-length-value*). Písmeno *T* popisuje typ dat v daném TLV bloku. Aplikací jsou zpracovávány tři typy objektů - detekované body (typ 1), clustery (typ 2) a sledované objekty (typ 3). Písmeno *L* je hodnota udávající délku dat v daném bloku. Písmeno *V* označuje konkrétní data daného bloku.

Každý datový rámec se skládá z hlavičky rámce s fixní velikostí 40 bytů, následované proměnným počtem TLV bloků. Data jsou zakódována principem little-endian.

Výše jsou pouze zmíněny tři typy detekovaných objektů – detekované body, clustery a sledované objekty. Pro úplnost je třeba vysvětlit jejich význam a původ jejich vzniku. Množina detekovaných objektů obsahuje všechny objekty, které jsou radarovým snímáním získány. Tento typ dat obsahuje obvykle velké množství šumu, vytvářeného odrazem vyslaného radarového signálu od všemožných objektů ve scéně. Jsou však základem pro následné pokročilejší algoritmy, které z nich dokáží vyextrahovat užitečnější data. Jeden záznam tohoto typu zpracovaný aplikací *Medium Range Radar* poskytuje informace o přesné poloze daného bodu (*X*, *Y* a *Z* souřadnice), hodnotu odpovídajícího vrcholu ve frekvenčním spektru po provedení *range-FFT* a hodnotu Dopplerova indexu, udávající rychlost pohybu daného bodu.

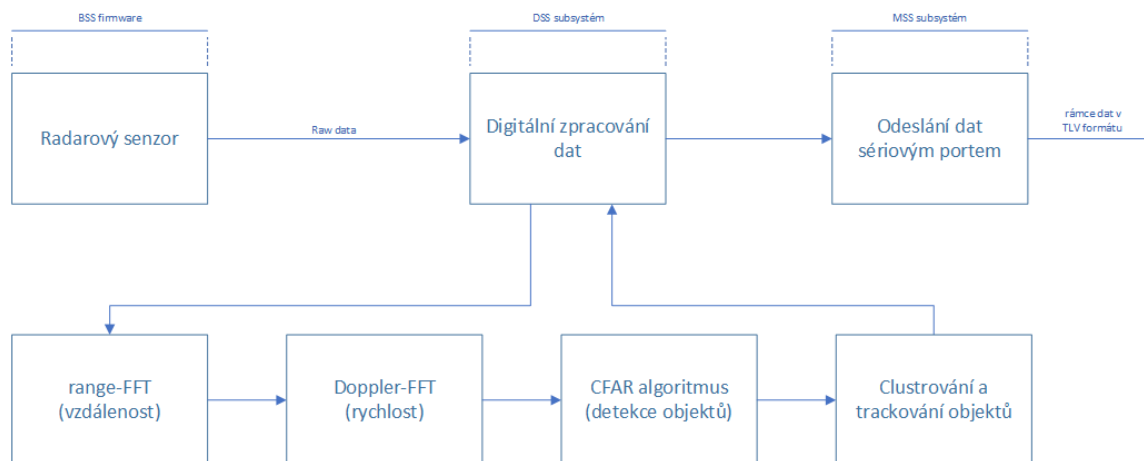
Druhým typem dat jsou clustery, které jsou vytvořeny na základě množiny detekovaných bodů. Cluster lze v podstatě popsat jako oblast s hustým výskytem detekovaných bodů. Pro určení jednotlivých clusterů je v rámci *MMR* demo aplikace využit algoritmus dBscan (*A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters*, popsáný v [3]). Výstupem clusterovacího algoritmu jsou souřadnice *X* a *Y* středu clusteru a jeho velikost ve směrech obou os *X* a *Y* (při předpokladu, že cluster má tvar obdélníku).

Posledním, z hlediska využití pro účely adaptivního tempomatu nejvýznamnějším, typem výstupních dat jsou sledované objekty (anglicky *Tracked objects*). Ty umožňují kontinuální sledování daných nejsilnějších a nejstálejších radarem detekovaných objektů. Vstupem pro jejich vytvoření je výstup clusterovacího algoritmu. Určení objektů tohoto typu probíhá pomocí standardního rozšířeného Kalmanova filtru se čtyřmi stavy ($[x, y, vx, vy]$), tedy souřadnice *X* a *Y* a relativní rychlosti v laterálním a podélném směru) a třemi vstupy ($[r, v, \sin(\Phi)]$), tedy vzdálenost, relativní rychlost a sinus azimutu), což je běžně využívaný nelineární algoritmus pro odhad a předpověď aktuální střední hodnoty. Je využit např. v řadě navigačních systémů včetně GPS². Nad tímto typem výstupu radaru jsou postaveny implementované aplikace prototypu i firmwaru.

²https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter

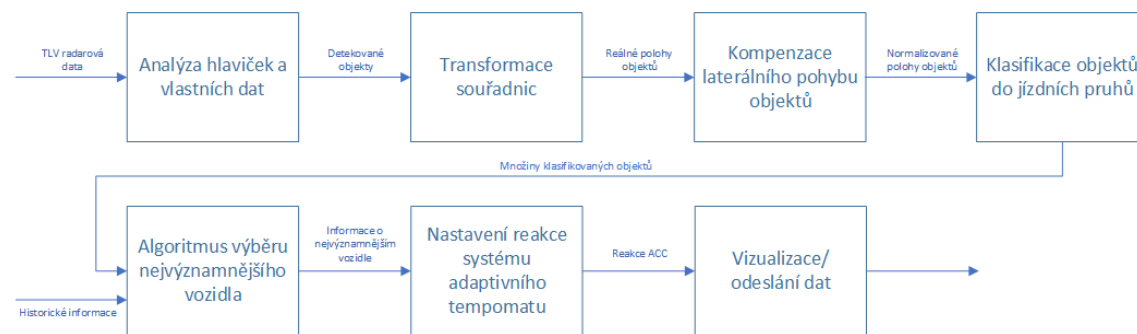
5.4 Návrh systému

Tato sekce představuje návrh systému, který je implementován v rámci prototypu a následně přímo jako firmware radarového modulu. Dříve, než bude uveden návrh implementovaného systému, je nezbytné stručně představit také řetězec zpracování surových radarových dat přímo na radarovém čipu. Tento proces ilustruje schéma 5.1. Všechny části již byly implementovány v rámci *Medium Range Radar* demo aplikace, ze které tato práce vychází. Vzdálenosti, rychlosti a úhly objektů jsou určovány metodami popsány v kapitole 4. Detekční algoritmus CFAR je vysvětlen například v práci [15].



Obrázek 5.1: Schéma zpracování signálu na čipu radaru. Převzato z [23], upraveno.

Výstupem jsou jednotlivé rámce předzpracovaných dat ve formátu TLV, popsaném detailně v sekci 5.3. V této podobě přebírá data prostřednictvím sériového portu prototyp implementovaný v Pythonu. Ten provádí postprocessing dat odpovídající blokovému diagramu 5.2.



Obrázek 5.2: Návrh systému zajišťující postprocessing radarových dat a funkcionalitu adaptivního tempomatu.

První fází je analýza hlaviček a dat příchozích rámců. Formát tohoto vstupu je popsán v sekci 5.3. Výstupem jsou jednotlivé detekované objekty všech typů, které jsou uloženy do odpovídajících datových struktur. Následně je nutné provést transformaci souřadnic, jelikož hodnoty z radaru neodpovídají hodnotám reálného metrického prostoru.

Další operací je kompenzace laterálního pohybu objektů. Ta má za úkol vyrovnat se se situací, kdy se objekty vzhledem k radaru nepohybují pouze v ose y , ale i v ose x (tato

situace například nastává v zatáčkách). Inspirací pro realizaci této metody je článek [13]. Díky kompenzaci lze zajistit, že i vozidlo jedoucí ve stejném jízdním pruhu v zatáčce, které by se bez kompenzace jevílo jako vozidlo v jiném jízdním pruhu, je správně rozeznáno a detekováno.

Následující blok zajišťuje rozdělení vozidel/objektů podle jízdních pruhů. Hlavním kritériem v tomto případě je šířka jízdního pruhu.

Po rozdělení vozidel do jednotlivých jízdních pruhů přichází na řadu algoritmus výběru nejvýznamnějšího vozidla z hlediska adaptivního tempomatu. Tato operace je v rámci post-processingu nejkompexnější, protože je nutné zajistit zvolení a nepřetržité sledování nikoliv nejbližšího, ale nejvýznamnějšího objektu. Radar totiž občas detekuje mimo platných objektů také různé další objekty, např. dopravní značky nebo svodidla podél silnice, případně i různý šum. Algoritmus si tedy s takovými situacemi musí umět poradit a ignorovat podobné předměty objevující se vzhledem k radaru blíže, než nejbližší významné vozidlo. Ke správnému rozhodování algoritmus využívá některá data uložená v rámci zpracování předchozích rámců.

Poté, co se úspěšně podaří zvolit nejvýznamnější vozidlo, je možné nastavit aktuální reakci systému adaptivního tempomatu vzhledem k dané dopravní situaci. Logika zvolení reakce je detailněji popsána v sekci 4.7.

Poslední část zpracování se liší u prototypu a firmwaru. V případě prototypu dojde k vizualizaci aktuálního stavu systému (reakce tempomatu, vzdálenost nejvýznamnějšího vozidla) a dopravní situace. Naopak v případě firmwaru dojde k odeslání výsledných dat přes výstupní rozhraní modulu, které je nutné vizualizovat. K tomu je opět možné využít prototypu běžícího v režimu pouhého zobrazování přijatých dat.

Kapitola 6

Implementace

Kapitola obsahuje popis implementace systému. V první části jsou uvedeny všechny nástroje, které byly použity v rámci této práce. Další sekce je věnovaná implementaci prototypu aplikace radarového adaptivního tempomatu využívajícího daný radarový senzor. Poslední sekce kapitoly popisuje implementaci logiky adaptivního tempomatu přímo jako firmwaru radarového modulu TI AWR1843.

6.1 Použité nástroje

- Python 3.8 – implementace prototypu, <https://www.python.org/>
- Jazyk C – implementace firmwaru radaru
- Matlab R2015aSP1 – drobné podpůrné skripty, tvorba grafů, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, licence VUT
- JetBrains PyCharm IDE – vývojové prostředí pro Python, komunitní verze, <https://www.jetbrains.com/pycharm/>
- TI Code Composer Studio IDE – volně dostupné vývojové prostředí pro implementaci a debugování firmwaru TI radarů, <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>
- UniFlash – volně dostupný software pro nahrávání programů do paměti radaru od firmy Texas Instruments, Inc., <http://www.ti.com/tool/UNIFLASH>
- L^AT_EX – tvorba technické zprávy, <https://www.latex-project.org/>
- Microsoft Visio Professional 2016 – tvorba diagramů

6.2 Implementace funkčního prototypu

Jak již bylo uvedeno výše, funkční prototyp systému je implementován v programovacím jazyce Python 3.8 s využitím řady knihoven. Základ aplikace byl poskytnut vedoucím práce a umožňoval zpracování a uložení příchozích radarových dat do odpovídajících datových struktur a základní vizualizaci dat. Program běží ve dvou paralelních vláknech – jedno vlákno se stará o grafické rozhraní a vizualizaci dat a druhé o samotné zpracování příchozích dat. Vlákna si mezi sebou předávají data pomocí sdílených proměnných definovaných v souboru `shared.py`. Pro nastavení aplikace je využit konfigurační soubor `config.ini`,

v němž lze nastavit např. mód běhu aplikace, typ připojení radaru k PC, cestu k uložené nahrávce nebo různé parametry grafického vizualizačního prostředí.

Popis GUI

Ukázka grafického vizualizéru dat se nachází na obrázku 6.1. Okno je rozděleno na pět základních informačních bloků.

V horní části se nacházejí dva bodové grafy zobrazující polohy detekovaných objektů. Levý horní graf podle intenzity barvy bodu poskytuje informaci o relativní rychlosti objektu vzhledem k radaru, zatímco pravý graf barevně rozlišuje jednotlivé typy detekovaných objektů (diskutovány v sekci 5.3) a navíc zobrazuje zeleně aktuálně nejvýznamnější vozidlo z hlediska adaptivního tempomatu. Vertikální čáry v obou grafech znázorňují šířku jízdních pruhů. Vzhledem k omezenému prostoru nejsou měřítka jednotlivých os proporcionální. Hodnoty obou os odpovídají jednotkám metrů.

Další částí jsou dva grafy v levé dolní části. Jimi podávané informace se vztahují čistě k adaptivnímu tempomatu. Horní graf zobrazuje průběh vývoje reakce adaptivního tempomatu na aktuální dopravní situaci. Nejaktuálnější hodnoty jsou zobrazovány zprava a celkem je zobrazen průběh posledních 100 rámců přijatého signálu, což odpovídá přibližně dvěma sekundám v reálném čase. Jednotlivé reakční hladiny jsou založeny na algoritmu nastavování reakce adaptivního tempomatu popsaného v sekci 4.7. Zde je také uvedeno, že tempomat pracuje ve dvou režimech – udržování vzdálenosti a rychlosti. Aktuální operační režim je indikován barvou průběhu reakce (modrá odpovídá módu udržování vzdálenosti, zelená módu udržování rychlosti).

Spodní graf pak zobrazuje vývoj vzdálenosti nejvýznamnějšího vozidla od radaru, opět za posledních 100 rámců. Horizontální červená čára odpovídá nastavené vzdálenosti, v níž se radar snaží držet vozidlo a podle níž tedy nastavuje reakce.

Posledním blokem v pravé dolní části okna je volitelně spuštěný videozáznam.

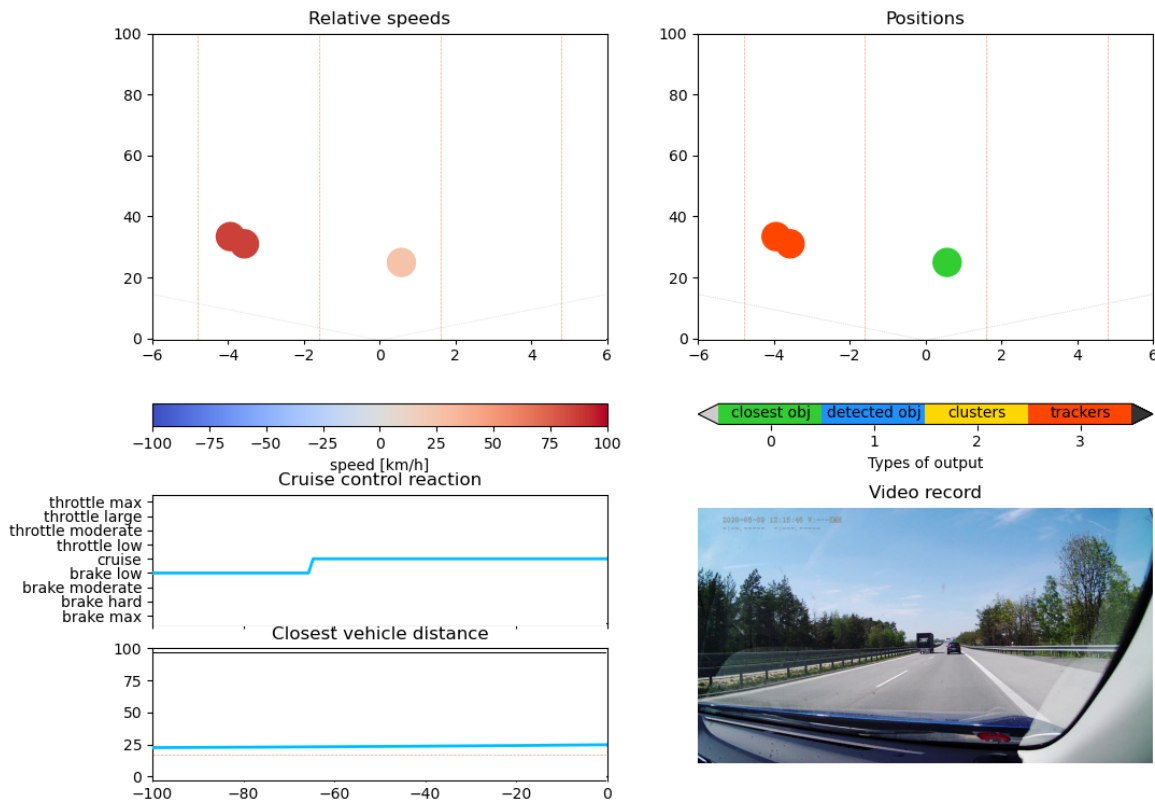
Implementační detaily

Implementace se řídila objektově orientovaným programovacím paradigmatem. Jednotlivé třídy nejsou mezi sebou provázány dědičností. V zásadě je aplikace složena ze pěti hlavních tříd – `DataReceiver`, `TLVparser`, `DataFilter`, `Acc` a `DataVisualizer`. Již jejich názvy napovídají, jakou úlohu v systému zastávají. Pořadí jejich uvedení není náhodné, v podstatě kopíruje tok dat v průběhu zpracování. Úkony, které provádějí objekty jednotlivých tříd, jsou detailněji prezentovány na diagramu toku dat 6.2.

Na digramu je vidět faktické rozdělení systému na dvě nezávislá vlákna (pravá část diagramu pro zpracování dat a levá část pro jejich vizualizaci) a jejich propojení pomocí sdíleného úložiště dat. Vizualizační vlákno implementuje třída `DataVisualizer`, která se stará o vytvoření grafického rozhraní i aktualizaci dat. Grafy jsou vytvořeny pomocí vizualizační knihovny `matplotlib`¹. Překreslování dat je periodické a je řízeno proměnnou udávající časový interval aktualizace. Vždy po aktualizaci jsou tak zobrazena aktuální data dostupná ve sdíleném úložišti, bez závislosti na jednotlivých příchozích rámcích radarového signálu.

Ke zpracování videa je využit balík `opencv-python`, jenž je wrapperem knihovny `OpenCV` pro Python. Problémem při zpracování videa pomocí Pythonu je nedostatečná rychlost zpracování jednotlivých snímků videa (bylo použito video natočené palubní kamerou v kvalitě FullHD se snímkovací frekvencí 30 fps), které významně degraduje rychlost vykreslování dat

¹<https://matplotlib.org/>



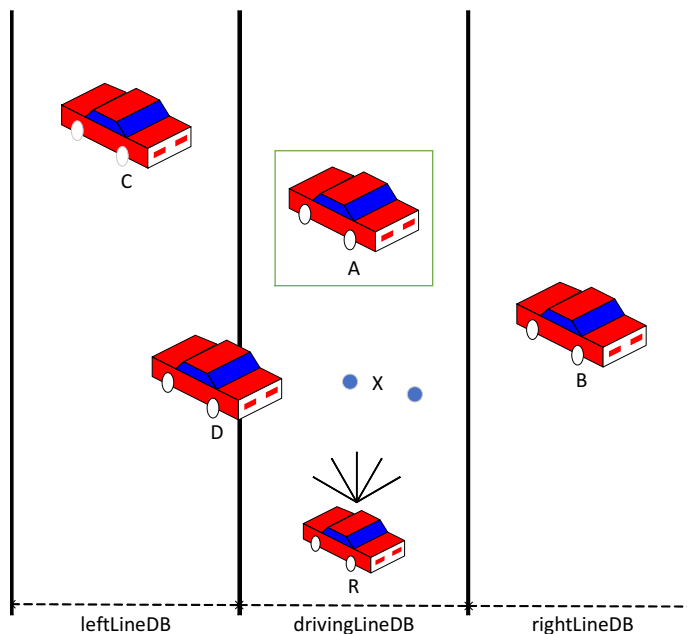
Obrázek 6.1: Ukázka grafického vizualizačního okna.

vizualizérem. Na testovacím stroji bez zpracování videa bylo pravidelně dosahováno frekvence vykreslování dat okolo 30 fps. Ovšem při zpracování a vykreslování videonahrávky s využitím všech dostupných snímků došlo až k desetinásobnému snížení snímkovací frekvence, což v praxi způsobovalo obrovské zpoždění zobrazovaných dat. Z tohoto důvodu byl implementován algoritmus, který dynamicky řídí přeskokování určitého počtu snímků videa pro zrychlení zpracování. Zobrazované video tedy není plynulé, nicméně pro ilustraci situace je využitelné.

Levá část diagramu zobrazuje zpracování jednoho rámce dat. Data jsou přijímána prostřednictvím datového kanálu radaru připojeného přes sériové rozhraní s přenosovou rychlostí 921 600 bit/s. O příjem dat se stará objekt třídy `DataReceiver`, který nejprve přijme a zpracuje hlavičku rámce s fixní velikostí. Z ní vyextrahuje velikost datové části rámce a data o této velikosti přijme. Analýzu přijatých dat provádí objekt třídy `TLVparser`. Ten nejprve rozdělí objekty podle jejich typů. V rámci optimalizace jsou zpracovávány pouze sledované objekty (typ 3), kterých je obecně mnohonásobně méně, než detekovaných objektů (typ 1).

Následující zpracování dat obstarává objekt třídy `DataFilter`. První prováděnou operací je výpočet průměrné laterální rychlosti detekovaných objektů. Na základě této informace lze kompenzovat pohyb objektů ve směru osy x přičtením vypočtené hodnoty k souřadnici x všech objektů, čímž dochází k "narovnání" zatáček. Díky tomu lze dosáhnout toho, že i vozidla, která se nacházejí v oblouku zatáčky ve stejném jízdním pruhu, jsou klasifikována do správného, tedy jízdního, pruhu.

Souřadnice detekovaných objektů jsou přenášeny v číselném formátu Q, což je binární formát čísel s pevnou desetinnou čárkou. Tento formát specifikuje pevný počet desetinných míst zakódovaného čísla (MRR demo využívá kódovací formát Q7, tedy každé takto

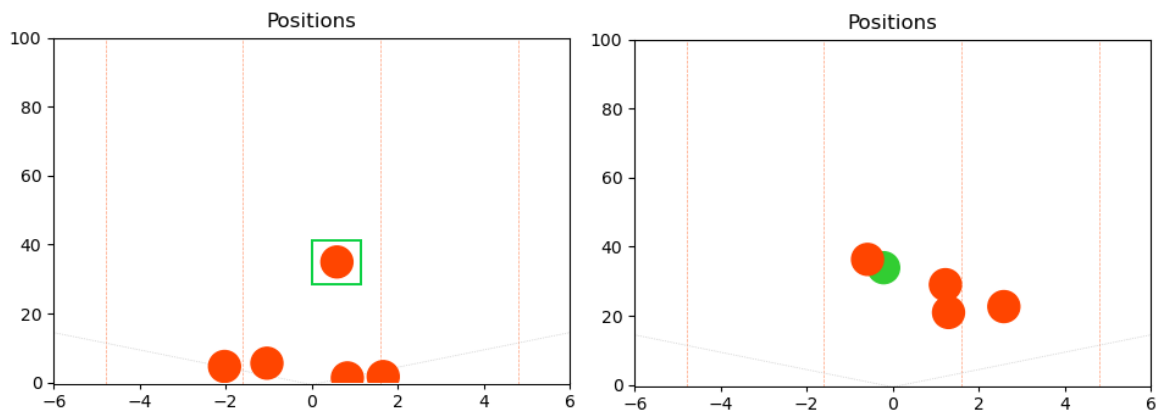


Obrázek 6.3: Ilustrace rozdělení uvažovaných jízdních pruhů a modelová situace detekovaných objektů.

příklad reálné situace, kdy je detekován opravdový cíl (označen zeleným obdélníkem) a současně také falešné objekty, jež jsou blíže radaru než cíl. Z radarem poskytnutých dat však nelze rozhodnout, zda falešné objekty jsou opravdu falešné. Metoda vyhledávající nejbližší objekt tak vybere jeden z falešných objektů a opravdový cíl ignoruje.

Při přípravě implementace bylo nastudováno množství různých řešení. Nicméně žádné z nich nebylo možné přímo využít, jelikož buď použitý radar neposkytoval potřebné informace, nebo metoda vyžadovala další zdroje dat (například údaj o aktuální rychlosti vozidla), které taktéž nebyly k dispozici. Implementované řešení tohoto problému tak vychází z experimentálního pozorování chování falešných cílů. Jejich přítomnost je totiž obvykle velmi krátká, bez přestávky se objevují pouze v několika po sobě jdoucích rámcích signálu. Aby byl cíl zvolen primárním cílem, musí nejprve splnit podmínky kandidáta na primární cíl. Hlavním kritériem kandidatury objektu je doba (reprezentovaná počtem rámců), po kterou je nepřetržitě detekován na podobném místě. Po překročení akceptačního prahu je kandidátní objekt povýšen do role primárního cíle. Nastavením vhodného prahu (proměnná `acceptanceThreshold` objektu třídy `ACC`) tak lze eliminovat zvolení náhodně detekovaného objektu jako primárního cíle. Nevýhodou však je odpovídající časové zpoždění, než je zvolen korektní cíl. Efekt této metody je demonstrován na obrázku 6.4b, kde je stále správně nastaven primární cíl (zelený bod) i přesto, že je ve stejném jízdním pruhu a blíže radaru detekován jiný objekt. Jakmile je primární cíl nastaven, systém udržuje informaci o jeho poloze a době, po kterou v této roli figuruje. Zároveň pro něj existuje ochranný interval, po který je cíl udržen v systému i přesto, že se již nenachází mezi detekovanými objekty. Tím je eliminována změna primárního cíle v případě, že dojde k detekčnímu výpadku tohoto objektu na velmi krátkou dobu.

Poslední fází toku dat je nastavení reakce adaptivního tempomatu. Její implementace vychází z metody popsané v sekci 4.7. Algoritmus využívá pro určení reakce fuzzy logiku, která je implementována s využitím knihovny `scikit-fuzzy`. Nastavení parametrů fuzzy množin



(a) Problém detekce falešných cílů při výběru primárního cíle. Zeleně je označený jediný platný cíl.

(b) Správně vyhodnocený primární cíl.

Obrázek 6.4: Příklady situací ztěžující výběr primárního cíle.

a definice fuzzy pravidel je provedeno v konstruktoru objektu třídy `Acc`. Vstupními proměnnými jsou relativní rychlost primárního cíle vzhledem ke zvolené referenční vzdálenosti, v níž se tempomat vozidlo svými reakcemi snaží držet, a relativní rychlost cíle od radaru. Výstup algoritmu pak tvoří hodnota odpovídající zvolené reakci tempomatu na aktuální dopravní situaci. Celkem systém rozlišuje devět reakčních stavů - maximální, velké, střední a slabé brzdění, maximální, velké, střední a nízké přidání plynu a udržování aktuální rychlosti. Vstupem algoritmu není hodnota absolutní rychlosti vozidla, jelikož tato informace nebyla dostupnými prostředky extrahovatelná. Ovšem algoritmus to ovlivňuje pouze nepatrně – byla-li by k dispozici i informace o aktuální rychlosti, bylo by možné zvolit jinou reakci například při překročení nastavené maximální rychlosti jízdy.

6.3 Implementace firmwaru radarového modulu

Druhou implementační částí byla implementace systému adaptivního tempomatu jako firmwaru radarového modulu TI AWR1843. Na rozdíl od prototypu byl firmware implementován v programovacím jazyce C. Vytvořený firmware opět vychází z oficiální demo aplikace *Medium Range Radar*.

Pro lepší orientaci je nutné zhruba popsat princip zpracovávání a předávání dat v mezi jednotlivými výpočetními jednotkami. Radar využívá procesor ARM-Cortex R4F pro řízení subsystému MSS, který se stará o konfiguraci, běh a komunikaci radarového modulu. Současně také disponuje výpočetní jednotkou C674x DSP pro digitální zpracování signálu v rámci subsystému DSS. Oba subsystémy jsou plně uživatelsky programovatelné. Oba procesory běží paralelně a jejich synchronizace a předávání dat je zajištěno zasíláním a vyzvedáváním zpráv ze schránky. Typické zpracování jednoho rámce signálu začíná jeho vysláním a přijetím fyzickými anténami, odkud se přes interní sběrnici data dostanou do DSS subsystému a je provedeno jejich digitální zpracování. Jakmile je tento proces dokončen, jsou výsledná zpracovaná data zaslána ve formě zprávy do schránky, odkud si je vyzvedne subsystém MSS a zajistí jejich odeslání přes výstupní rozhraní. Protože jsou předaná data zpracovávána na jiném procesoru s vlastním adresním prostorem, je nutné po přijetí MSS procesorem provést překlad adres z adresního prostoru subsystémů DSP do adresního prostoru MSS.

Vzhledem k tomu, že systém adaptivního procesoru provádí postprocessing jednotlivých detekovaných objektů, jeho kód musí proběhnout až ve chvíli, kdy jsou všechna tato data k dispozici. Proto je systém implementován v rámci subsystému MSS mezi přijetím zpracovaných dat a jejich odesláním na výstupní rozhraní. Byla tedy upravena funkce `MmwDemo_mboxReadTask` v souboru `mss_main.c`, jenž řídí běh procesoru MSS.

Samotná implementace logiky adaptivní tempomatu se nachází v novém zdrojovém souboru `acc.c`. Jako výstupní formát nastavené reakce bylo vytvořen nový typ TLV paketu s hodnotou typu 42 a délkou dat 6 bytů. V rámci něj se přenášejí informace uložené ve struktuře typu `reaction_t` obsahující numerickou hodnotu reakce ACC, korespondující s hodnotami využívanými prototypem, a souřadnice X a Y objektu, který byl systémem zvolen jako primární cíl.

Takto vytvořený TLV blok je pak přidán na konec již vytvořeného paketu a je odeslán spolu s detekovanými objekty. Pro správnou interpretaci je nutné upravit také hlavičku paketu, protože se zvýší počet odeslaných TLV bloků a tím pádem i délka paketu. Odeslaná data jsou pak přijata a zobrazena aplikací prototypu spuštěné v režimu pouhého zobrazování přijatých dat.

Implementovaná logika adaptivního tempomatu vychází z algoritmu implementovaného v rámci prototypu. Samozřejmě zde odpadá nutnost rozbalování a analýzy paketu, protože jsou k dispozici přímo zpracovaná radarová data. Taktéž není nutné jakkoliv řešit vizuální prezentaci dat, o kterou se stará prototyp. Nicméně algoritmus implementovaný ve firmwaru je oproti algoritmu prototypu zjednodušený, zejména části výběru primárního cíle a nastavení reakce. Algoritmus výběru primárního cíle je poměrně komplikovaný a vyžaduje pečlivé ladění, což se v průběhu implementace ukázalo jako problematické. Používané vývojové prostředí sice umožňuje on-chip debug využívající rozhraní JTAG adaptéru, ale samotné krokování zdrojového kódu se nepodařilo s poskytnutým radarem zprovoznit. Tato skutečnost velmi zásadně zkomplikovala vývoj a ladění aplikace, a proto nebylo možné dostatečně odladit všechny části kódu. Logika výběru reakce tempomatu je zjednodušenou verzí logiky implementované v rámci prototypu bez využití fuzzy logiky, protože nebyla nalezena žádná využitelná knihovna pro práci s fuzzy logikou a bylo by ji tedy nutné kompletně implementovat.

Další komplikací při vývoji byl fakt, že nebylo možné využívat pro potřeby testování a ladění nasbíraná a uložená data z reálného provozu. Pro ověření funkčnosti tedy bylo vždy nutné instalovat radar na vozidlo a vyjet s ním do provozu. To značně snižovalo efektivitu při implementaci a prodlužovalo dobu vývoje.

Výsledkem implementace je funkční systém radarového senzoru adaptivního tempomatu implementovaného jako firmwaru radarového modulu v základní verzi.

Kapitola 7

Testování

Tato kapitola popisuje jednotlivé testovací fáze a metodiku testů. Samozřejmě jsou v ní předloženy a diskutovány dosažené výsledky testování implementovaných systémů. Přibližuje také proces sběru testovacích dat. Na závěr pak uvádí porovnání s jiným radarovým modulem a rozebírá možné využití, vylepšení a rozšíření práce.

7.1 Obecné informace o testování

Testování aplikace lze rozdělit do tří hlavních fází. První cyklus probíhal již od počátku samotné implementace prototypu. Byla vytvořena datová sada s odpovídajícími video záznamy a v průběhu implementace byly průběžné výsledky manuálně ověřovány autorem. Tato fáze probíhala pouze nad offline daty uloženými při sběru. Více informací o sběru dat je uvedeno v následující sekci 7.2. Prvotní datová sada byla nasbírána s využitím nezměněné demo aplikace *Medium Range Radar*. V této konfiguraci se jeden rámeček vyslaného signálu skládá ze dvou subrámečků – MRR (*Medium Range Radar Subframe*) a USRR (*Ultra-short Range Radar Subframe*). MRR subrámeček operuje ve vysílacím režimu beamforming, díky čemuž je schopen detekovat objekty až na 120 metrů (zde se rozchází oficiální dokumentace, která hovoří o maximální detekovatelné vzdálenosti až 150 metrů a informace ze zdrojového kódu aplikace a vlastního měření, které potvrdilo maximální vzdálenost okolo 120 m) s rozlišením okolo 70 cm. USRR subrámeček naopak operuje v režimu MIMO, což přináší širší zorné pole, a je schopen detekovat objekty do vzdálenosti pouze 20 metrů s výrazně lepším rozlišením okolo 4 cm. Vzhledem k povaze systému adaptivního tempomatu jsou mnohem lépe využitelné informace z MRR subrámečků.

Druhá testovací fáze proběhla po implementování minimálního funkčního prototypu systému. Jejím hlavním cílem bylo ověřit dosavadní výsledky systému v online režimu přímo v silničním provozu a nasbírat další data, která by pokrývala různé dopravní situace, na něž bylo v prvním cyklu zapomenuto. I tato fáze probíhala se stejným firmwarem radaru jako fáze předchozí.

Závěrečná testovací fáze proběhla po dokončení implementace prototypu i firmwaru radaru. Cílem bylo vyhodnotit přesnost a spolehlivost implementovaných systémů. Testování probíhalo v reálném čase a bylo využito několik různých konfigurací firmwaru radarového modulu:

- Původní MRR demo – rámeček složený z MRR a USRR subrámečků.
- Upravené MRR demo – rámeček složený pouze z MRR subrámečku

- Aplikace adaptivního tempomatu – konfigurace vycházející z upraveného MRR dema, rámec složen z MRR subrámce. Spolu s detekovanými objekty je zaslána také vypočtená reakce adaptivního tempomatu.

Radar byl na vozidle upevněn v pravé části masky a zdroj napájení, jímž byla powerbanka, byl upevněn k přednímu nárazníku. Všechna testování probíhala za příznivého počasí s teplotou okolo 20 °C. Pro fáze dvě a tři bylo využito druhé vozidlo, jež bezpečně umožnilo simulovat různé dopravní situace. Testování probíhalo většinou na dálnici, pro kterou byl systém vyladován. Nicméně pro kompletnost byla ověřena funkčnost systému také na jednoproudových silnicích a při průjezdu městem a jako speciální případ jízdy na dálnici probíhalo měření v úseku zúžených jízdních pruhů kvůli stavebním pracím.

Metoda vyhodnocování přesnosti a spolehlivost systému je empirická a za referenční hodnoty jsou považovány takové reakce systému, které vycházejí z logiky funkčnosti adaptivních tempomatů v daných situacích.

Před začátkem testování byla vždy provedena kalibrace směru vysílání a vzdálenosti radaru. Referenční vozidlo s upevněným radarem bylo postaveno přímo proti jinému vozu a byla metrem změřena vzdálenost mezi nimi. Ta pak byla porovnána s hodnotou naměřenou aplikací a v případě potřeby byla provedena softwarová korekce přepočtu souřadnic. Zároveň byl také prověřen úhel natočení uchyceného radaru. Protože maska referenčního vozu v místě, kde byl radar uchycen, není rovná, nepodařilo se ani v jednom případě radar upevnit tak, aby směřoval naprosto přímo rovně. Nicméně kalibrací byla vždy zjištěna hodnota, která byla při zpracování dat přičtena k souřadnici x každého detekovaného bodu tak, aby byly objekty zobrazovány na správných místech.

V průběhu práce s radarovým modulem bylo pozorováno velké zahřívání čipu. Při orientačním měření nechlazeného čipu byla naměřena teplota přesahující 70 °C. Při testování radaru za jízdy bylo zahřívání výrazně redukováno díky chlazení okolním vzduchem.

7.2 Sběr dat

Pro úspěšnou implementaci bylo nutné vytvořit odpovídající datovou sadu. Jelikož je adaptivní tempomat primárně využíván na vícekoridorových silnicích (dálnice, rychlostní silnice), probíhal sběr dat primárně na nich. Část dat byla nasbírána na dvouproudé silnici I/43 v Brně-Králově poli. Zbytek dat pak pochází z dálnice D1 za nižšího víkendového provozu. Při měření byla využita dvě vozidla spojená vysílačkou, která simulovala nejružnější dopravní situace. Proto je datová sada poměrně široká a obsahuje velkou škálu různých situací, se kterými se musí adaptivní tempomat vyrovnat. Datová sada také obsahuje nahrávky jízdy ve zúžených dopravních pruzích při průjezdu stavenišťem.

Pro kompletnost sady ještě bylo pořízeno několik záznamů jízdy na běžné meziměstské jednoproudové silnici. Nicméně tyto silnice nejsou z principu příliš vhodné pro použití adaptivního tempomatu kvůli častým zatáčkám, vegetaci okolo silnice a podobným věcem, které znemožňují tempomatu přesné vyhodnocování dopravní situace.

Jednotlivé datové nahrávky jsou uloženy ve formě binárních souborů s příponou .bin. Ke každé nahrávce pak byl pořízen i videozáznam z palubní kamery umístěné ve vozidle. Tyto záznamy slouží k demonstračním účelům a k vizuálnímu ověření správnosti výsledků v průběhu implementace.



Obrázek 7.1: Fotografie upevnění radarového modulu a zdroje napájení na masku vozidla při sběru dat.

7.3 Testovací případy a jejich vyhodnocení

Tato sekce popisuje jednotlivé testovací případy. Nejedná o kompletní testovací sadu verifikující veškeré možné scénáře, nicméně snahou bylo dostupnými prostředky prověřit co nejvíce různých situací. První podčást informuje o testech Python prototypu, který je s těžší částí této práce. Druhá podsekce pak zmiňuje testování implementovaného firmwaru. Všechny reakce tempomatu v testech byly počítány vzhledem k požadované vzdálenosti 40 metrů od vpředu jedoucího vozidla.

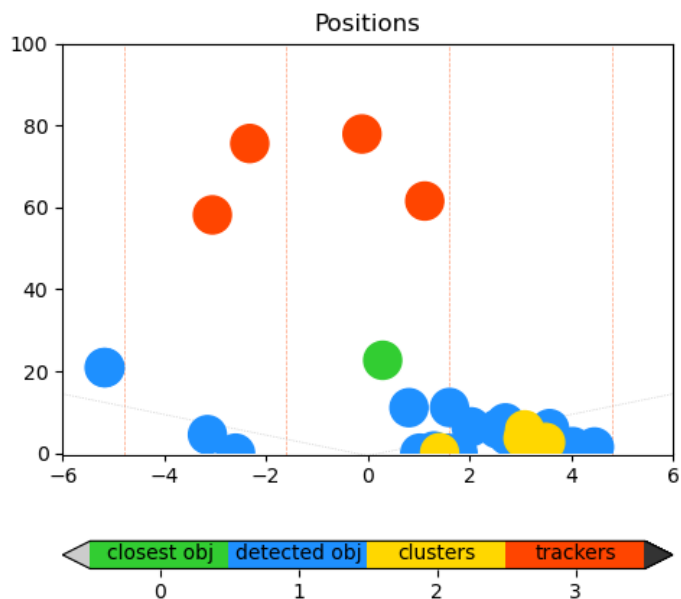
Testování prototypu

Testovací případy jsou rozděleny do dvou kategorií. První z nich je testování a vyhodnocení různých dopravních situací. Druhou kategorií je testování různých konfigurací aplikace.

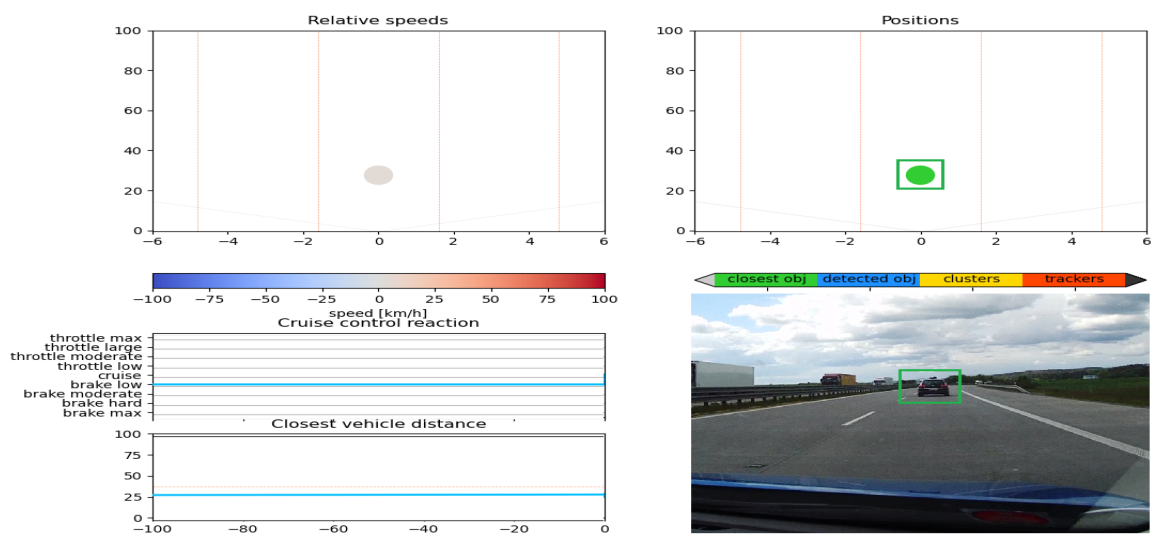
Co se týče rychlosti aplikace, je třeba ji rozdělit na dva případy. V případě běhu v reálném čase je schopna fungovat bez jakéhokoli zpoždění v případě, že jsou zpracovávány pouze TLV pakety typu 3, které jsou využívány pro účely adaptivního tempomatu. Pokud jsou zpracovávány i TLV pakety typů 1 a 2, občas dochází k drobné prodlevě zpracování, jelikož těchto bodů je řádově mnohem více než sledovaných objektů typu 3, viz ukázka na obrázku 7.2.

V případě běhu aplikace v režimu přehrávání uloženého záznamu dochází ke zpomalení. To je způsobeno pravděpodobně pomalou prací Pythonu se souborem obsahující nahraná data. Rychlost aplikace běží rychlostí 0,4-0,6 x vůči reálnému času v závislosti na množství zpracovávaných dat. V případě přehrávání video záznamu je rychlost aplikace ještě více snížena.

První modelovou situací je nejzákladnější případ dopravní situace, kdy se před referenčním vozidlem nachází pouze jedno vozidlo jedoucí podobnou rychlostí na rovném úseku silnice. Vyhodnocení této situace se nachází na obrázku 7.3. Zeleně označené vozidlo je správně detekováno a zvoleno jako primární cíl a je nastavena vhodná reakce mírného brzdění z důvodu krátké vzdálenosti mezi vozidly. Spolehlivost systému v těchto situacích je téměř stoprocentní.



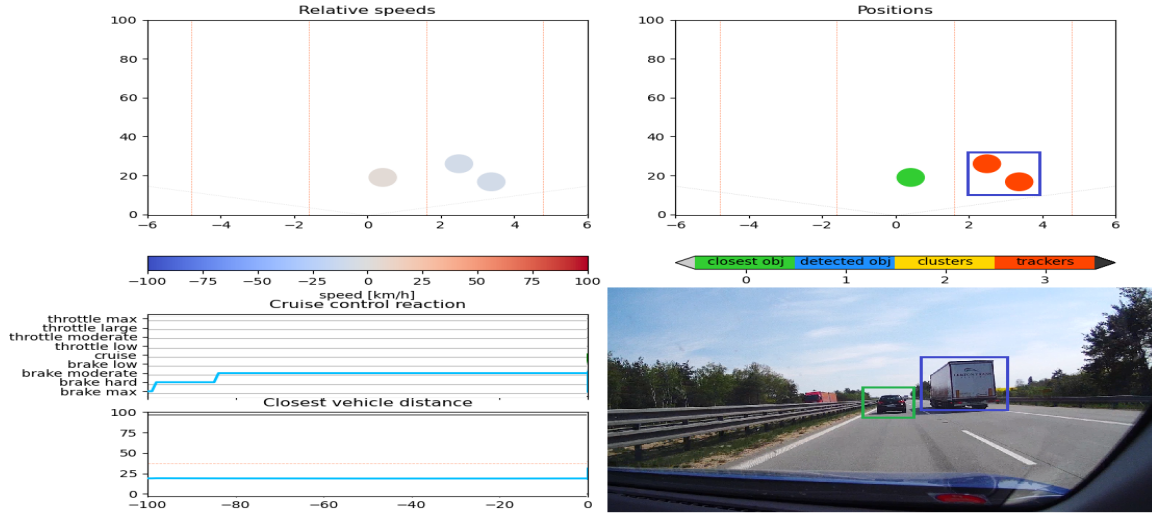
Obrázek 7.2: Ukázka poměru počtu jednotlivých detekovaných typů objektů radarem. Modré body odpovídají detekovaným objektům (TLV typ 1), žluté body clusterům (TLV typ 2) a červené se zeleným sledovaným objektům (TLV typ 3), které jsou aktivně využívány systémem.



Obrázek 7.3: Testovaný případ jednoho detekovaného vozidla jedoucího podobnou rychlostí na rovném úseku dálnice.

Dalším testem je současná detekce vozidel jedoucích v různých pruzích. Výsledek situace se nachází na obrázku 7.4. I v tomto případě dojde ke správnému posouzení situace. Reakcí tempomatu na tuto situaci je středně intenzivní brzdění, protože referenční a před ním jedoucí vozidla mají velmi podobnou rychlost a jsou relativně blízko u sebe. Na grafu zobrazujícím pozice detekovaných objektů je vidět, že jsou detekovány celkem tři objekty i přesto, že se ve scéně nacházejí pouze dvě vozidla. Toto je jednou z pozorovaných detekčních vlastností radaru, který v určitých případech pro velké objekty (v tomto případě modře

označený kamion) detekuje více bodů, které však přísluší pouze jednomu objektu. Tyto falešné body se však obvykle nacházejí velmi blízko reálného bodu, a tedy nemají nepříznivý vliv při výběru cíle tempomatu. Vyhodnocování situací podobných této je tedy opět velmi spolehlivé a přesné.

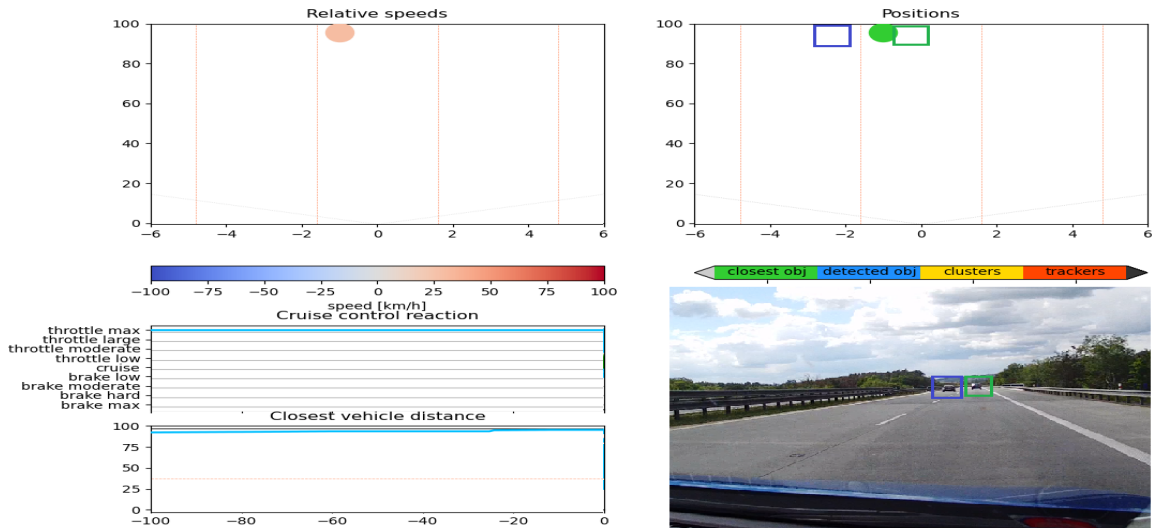


Obrázek 7.4: Dvě detekovaná vozidla jedoucí v různých jízdních pruzích, každé různou rychlostí.

Dalším provedeným testem byl test maximálního dosahu radaru. Ten je udáván, jak již bylo zmíněno dříve, až do vzdálenosti 120 metrů. Tento test zahrnoval dva podtesty – ověření maximální detekovatelné vzdálenosti vozidla, pokud se žádné jiné ve scéně nevy-skytovalo, a ověření maximálního dosahu v případě, že vedle sebe jela dvě vozidla. Oba testy byly provedeny ve velmi dlouhém širokém úseku dálnice s anténou vysílající pouze MRR subbrámce v režimu beamforming, bez přítomnosti USRR subbrámců.

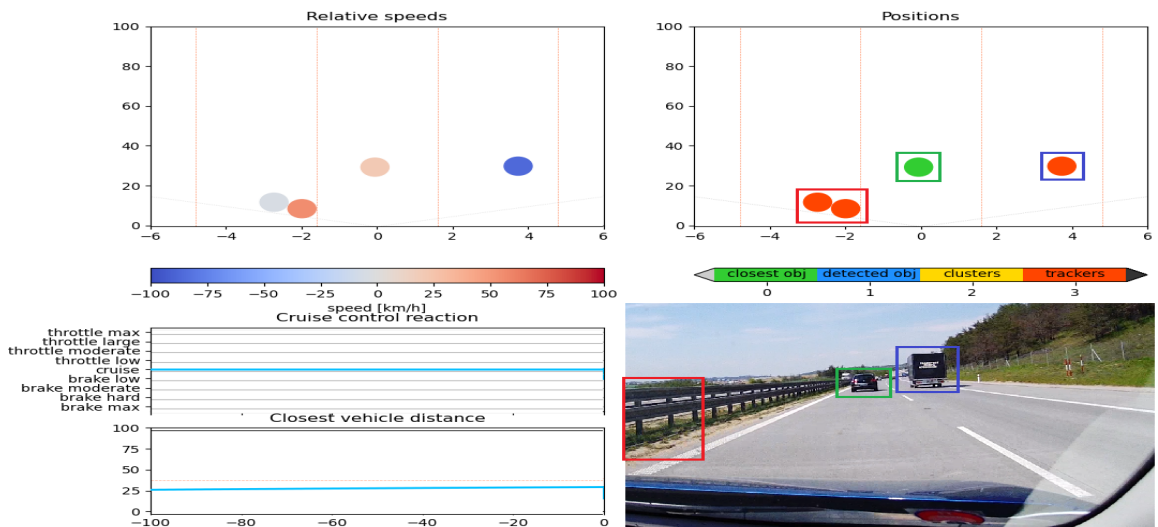
Co se týče maximální detekované vzdálenosti jednoho vozidla, byla potvrzena udávaná vzdálenost okolo 120 metrů. Při větší vzdálenosti již radar nebyl schopen vozidlo rozpoznat a nedetekoval žádné objekty.

Druhým testem pak byla maximální detekovatelná vzdálenost vozidel jedoucích vedle sebe ve vedlejších jízdních pruzích. Snímek této situace se nachází na obrázku 7.5. Při porovnání pozic modře a zeleně označených vozidel na snímku videozáznamu s pozicemi detekovaných objektů v grafu je zřejmé, že v této vzdálenosti již radar není schopen rozli-šit jednotlivá vozidla a jimi odražené signály spojí do jednoho falešného objektu (v grafu označený zeleným bodem primárního cíle), který je přibližně průměrem pozic obou vozidel. Vzdálenost, od níž již není možné rozeznat běžné automobily, se pohybuje přibližně okolo 90 metrů.



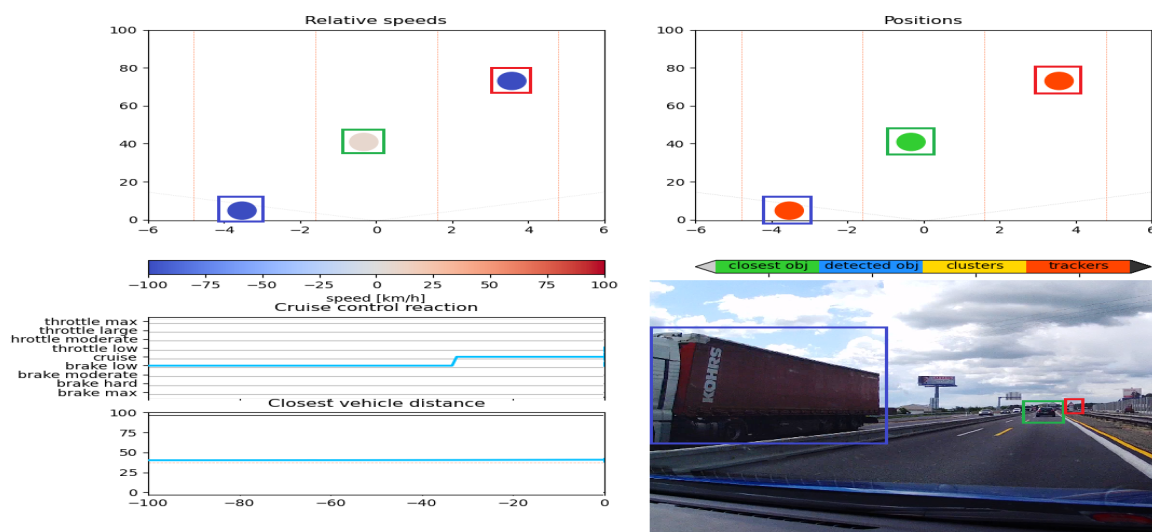
Obrázek 7.5: Test maximální rozlišitelné vzdálenosti dvou vedle sebe jedoucích vozidel.

Dalším zkoumaným případem je situace, kdy jsou detekovány různé postranní objekty. Tato situace je vidět na obrázku 7.6. Nejčastějším postranním detekovaným objektem jsou při jízdě na dálnici svodidla ve vzdálenosti do 10-20 metrů. V ilustrované situaci tyto objekty nezpůsobují žádné chyby funkčnosti adaptivního tempomatu, nicméně v průběhu testování byly zaznamenány situace, kdy se detekovaná svodidla objevila až v jízdním pruhu a ovlivňovala výběr primárního cíle a reakce tempomatu. Zobrazená situace byla detekována radarem v konfiguraci takové, že každý rámeček obsahoval MRR i USRR subrámce. A právě USRR subrámce, díky nimž je možné detekovat i velmi malé objekty s vysokou přesností a v širokém úhlovém rozsahu, způsobují tyto nechtěné detekce postranních objektů v krátké vzdálenosti. Při použití konfigurace radaru, která využívala pouze méně přesné MRR subrámce s dlouhým dosahem, byly tyto nechtěné detekce eliminovány.



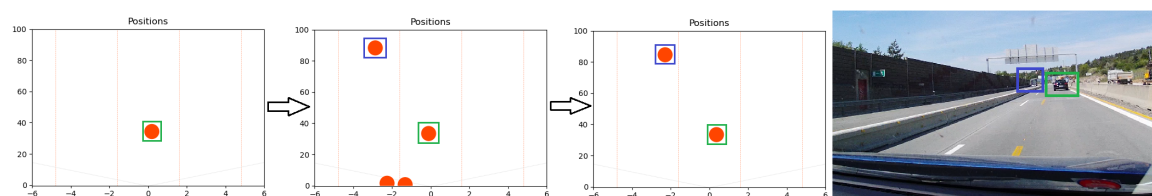
Obrázek 7.6: Příklad detekce nechtěných postranních objektů způsobené využitím USRR rámečků.

S předchozím testovacím případem souvisí i následující situace. Systém byl zkoušen také při jízdě ve zúžených jízdnicích v dopravním omezení na dálnici. Takto zúžené pruhy mají obvykle šířku 2-2,5 metru, přičemž běžný jízdni pruh má šířku 3,5-3,75 metru. Ukázka z této situace se nachází na obrázku 7.7. Jak je vidět, vpředu jedoucí vozidlo je v tomto případě detekováno a vyhodnoceno správně. Současně je však také detekován (v levém pruhu) modře označený kamion a objekt, pravděpodobně dopravní značení po pravé straně jízdniho pruhu. Přesnost a spolehlivost systému při jízdě ve zúžených jízdnicích je poměrně nízká, zejména z důvodu detekcí různých postranních objektů a protijedoucích vozidel. Použitelný je pouze v případě jízdy v rovném úseku zúžení. Nicméně nastavením šířky jízdniho pruhu odpovídající šířce zúženého pruhu by došlo k lepšímu vyhodnocování.



Obrázek 7.7: Ukázka situace při jízdě ve zúžených jízdnicích.

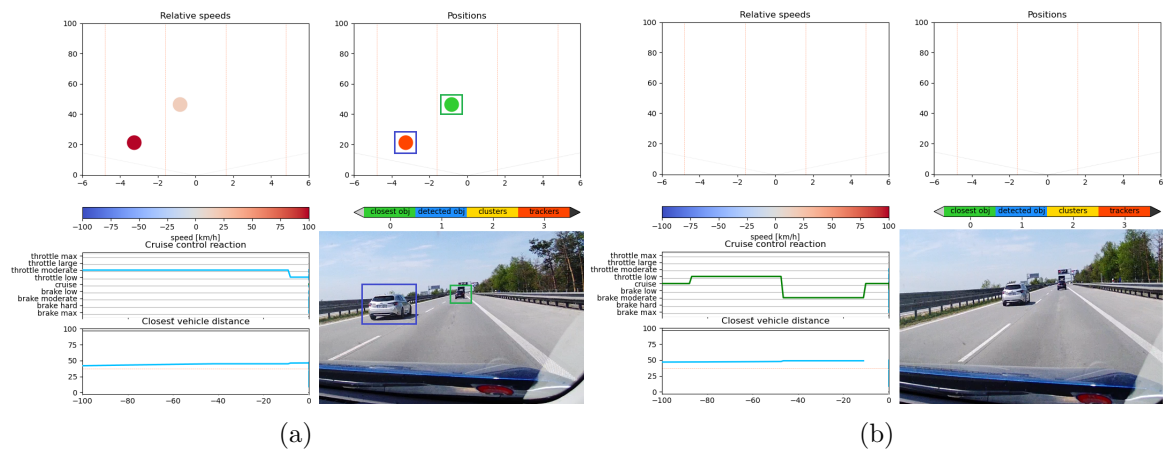
Sníženou spolehlivost systému ve výše zmíněném případě demonstruje sekvence situací na obrázku 7.8. Sekvence je vytvořena ze tří rámců vybraných z 20 po sobě jdoucích rámců dat, což odpovídá reálné době méně než jedné sekundy. Na levém a pravém grafu je v jízdnicím pruhu vidět pouze objekt odpovídající vpředu jedoucímu vozidlu. To by tedy mělo být zvoleno primárním cílem pro adaptivní tempomat. Nicméně, jak je vidět na prostředním grafu, v průběhu jízdy dochází k náhodné detekci falešných objektů v bezprostřední blízkosti radaru. V takovém případě ale vždy dojde ke zvolení nesprávného kandidáta na cíl pro adaptivní tempomat, který nahradí legitimní zeleně označené kandidátní vozidlo. Poté, co tyto falešné objekty během několika rámců opět zmizí, vrací se do pozice kandidátního objektu na cíl správné vozidlo. Nicméně počítadlo doby jeho přítomnosti je tímto vynulováno a celý kandidátní proces začíná znovu, čímž se oddaluje jeho zvolení primárním cílem.



Obrázek 7.8: Sekvence rámců, pořádaných v časovém intervalu menším než 1 sekunda, demonstrující problém při výběru primárního cíle způsobený náhodně detekovanými objekty.

Další testovací případ se týká prudší změny směru jízdy referenčního vozidla. Ta na dálnici nastává například při přejíždění mezi jednotlivými pruhy nebo obecně pouze krátkodobým odchýlením směru jízdy od směru jízdního pruhu. Tato situace je znázorněna v porovnání 7.9. Porovnávány jsou dvě situace, které se odehrály těsně po sobě. Na obrázku 7.9a je vidět správně detekovaná a vyhodnocená situace. V tuto chvíli jelo referenční vozidlo rovnoběžně s bílou čarou oddělující jízdní pruhy.

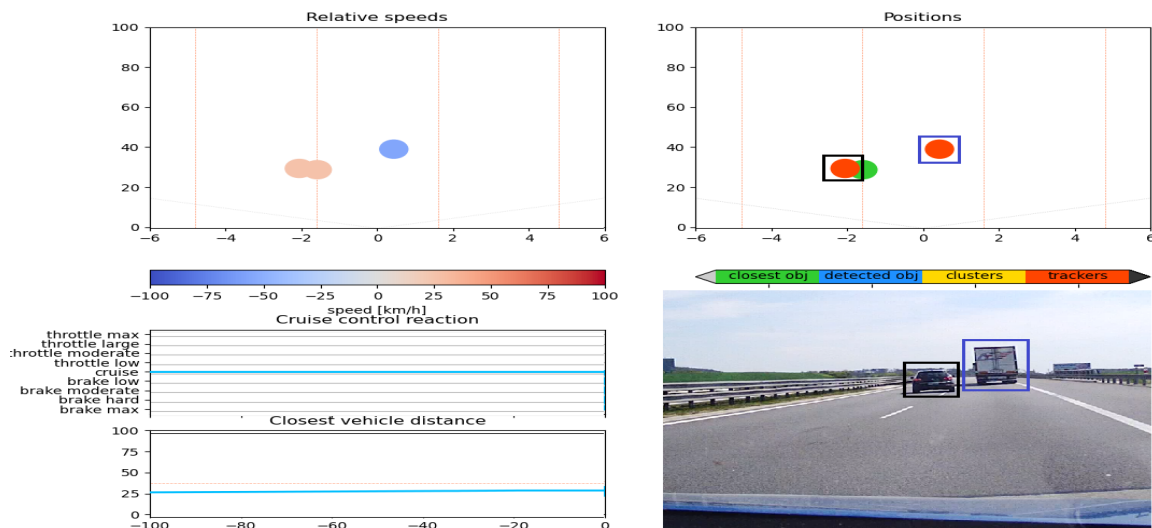
Snímek 7.9b zachycuje v podstatě totožnou situaci s tím rozdílem, že v tomto okamžiku došlo k prudšímu vychýlení směru jízdy referenčního vozidla doleva. Tím došlo samozřejmě i ke změně snímacího úhlu radaru vůči dané situaci. Kvůli této změně radar nebyl schopen kontinuálně sledovat posouvající se vozidla, a proto je graf poloh detekovaných objektů prázdný. Po ustálení pohybu opět došlo ke správné detekci vozidel, nicméně tato přepočítávací doba byla tak velká, že došlo ke ztrátě primárního cíle a přepnutí adaptivního tempomatu do režimu udržování rychlosti. Podobné situace se při běžné jízdě objevují poměrně často a implementovaný systém v nich není příliš spolehlivý.



Obrázek 7.9: Vliv prudké změny směru na okamžitou detekční schopnost radaru.

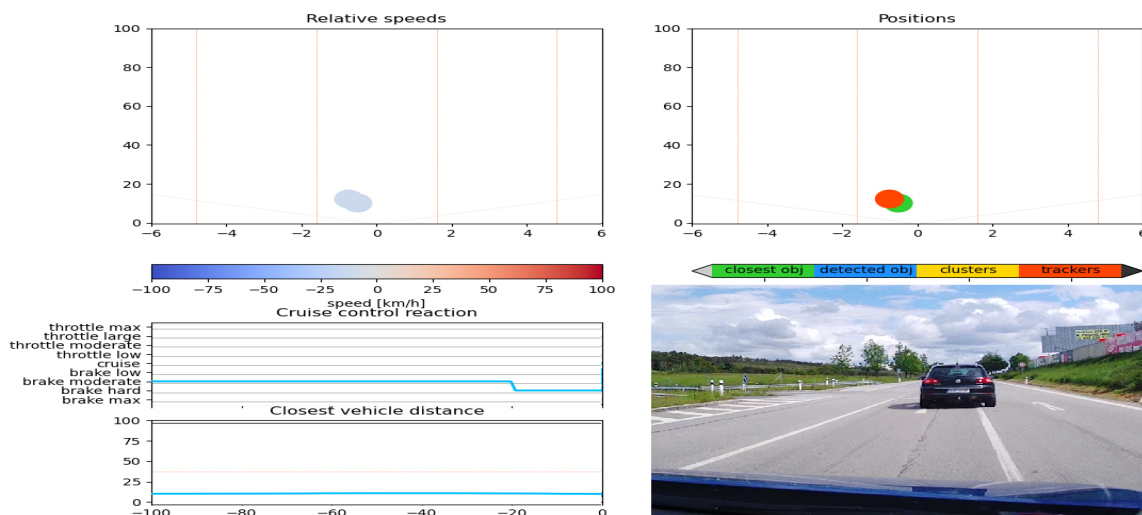
Další testovací případ na obrázku 7.10 demonstruje časové zpoždění mezi výměnou primárních cílů adaptivního tempomatu. V této situaci původní primární cíl (černé vozidlo) zcela přešel do vedlejšího jízdního pruhu. V této chvíli se stává primárním cílem tempomatu modře označený kamion, který je však v zachyceném okamžiku ve stavu kandidáta na primární cíl a za stále platný primární cíl je považována poslední zachycená pozice černého vozidla v hlavním jízdním pruhu před přejetím do vedlejšího pruhu (zelený bod v grafu pozic). Toto zpoždění je závislé na zvolené době, po jejímž uplynutí je vozidlo nastaveno jako primární cíl. Čím větší doba je nastavena, tím odolnější je algoritmus vůči krátkodobým detekčním výpadkům. Na druhou stranu ale roste reakční zpoždění při podobné změně dopravní situace a zároveň je algoritmus výběru primárního cíle citlivější na náhodně detekované objekty v blízkosti radaru. Experimentálně byla tato doba nastavena na 40 rámců signálu, což poskytuje vhodný kompromis mezi zpožděním (cca 1 sekunda) a odolností vůči detekčním výpadkům.

Posledním testovacím případem je využití systému při jízdě v pomalu jedoucí koloně vozidel. Vyhodnocení situace se nachází na obrázku 7.11. Jak je v grafu rychlostí vidět, obě vozidla se pohybují velmi podobnou rychlostí ve vzdálenosti okolo 10 metrů. Protože je však požadovaná vzdálenost mezi vozidly nastavena na 40 metrů, adaptivní tempomat v tomto případě situaci nevyhodnotil správně (místo očekávané reakce mírného brzdění nebo žádné



Obrázek 7.10: Demonstrace chování systému při změně primárního cíle adaptivního tempomatu.

změny rychlosti nastavuje reakci intenzivního brzdění). Toto chování je zejména způsobené chybějící informací o aktuální rychlosti jízdy. Pokud by tato hodnota byla k dispozici, bylo by možné dynamicky nastavovat požadovanou bezpečnou vzdálenost mezi vozidly v závislosti na aktuální rychlosti. Nicméně tato verze systému je v situaci těsné jízdy v pomalu jedoucí koloně použitelná pouze v případě ručního nastavení velmi malé vzdálenosti mezi vozidly.



Obrázek 7.11: Demonstrace chování systému v simulované těsné jízdě v pomalu jedoucí koloně vozidel.

Následující experimenty zkoumají vliv nastavení hlavních parametrů systému na jeho přesnost a spolehlivost. Výsledky jsou shrnuty v tabulce níže. Tabulka pro každý testovaný parametr uvádí, v jaké třídě se nachází, jeho optimální experimentálně ověřenou hodnotu a popis vlivu zvýšení a snížení hodnoty na systém.

Parametr	Třída	Optimální hodnota	Zvýšení	Snížení
lateralOffset	TLVparser	lineární funkce	Lepší detekci cílů v prudších zatáčkách. Naopak může také vychýlit cíl mimo jeho jízdní pruh.	Odstraněním kompenzační hodnoty laterálního pohybu dojde k vyhlazení pohybu objektů.
expiration	DataFilter	8 rámců	Větší odolnost vůči detekčnímu výpadku objektu. Více falešných objektů.	Nízký počet falešných objektů. Možné zamaskování reálného cíle.
inDbThreshold	DataFilter	25 rámců	Minimalizace falešných objektů. Větší citlivost na detekční výpadky.	Zvýšení počtu falešných objektů.
driving line width	shared ¹	1,6 metru (optimalizováno pro dálnici, polovina celkové šířky)	Špatná klasifikace vozidel do jízdních pruhů.	Redukce detekovaných postranních objektů. Úzký jízdní pruh.
desired distance	shared ¹	40 metrů	Požadovaná vzdálenost mezi vozidly, ovlivňuje reakce tempomatu.	
radius	shared ¹	1,5 metru	Poloměr kružnice považované za okolí objektu. Zvýšení vede ke spojování detekovaných objektů.	Menší schopnost vyrovnání se s výchyly detekované polohy.

default Expiration	Expi- ration	Acc	30 rámců	Doba, po níž je již primární cíl považován za platný, i když již není detekovaný. Zvýšení vede k větší robustnosti vůči detekčním výpadkům, ale zvyšuje reakční prodlevu systému.	Rychlejší reakční doba na změnu situace. Příliš častá změna primárního cíle.
acceptance Threshold		Acc	40 rámců	Doba, po které musí být kandidát na primární cíl detekován jako nejbližší objekt. Zvýšení hodnoty minimalizuje možnost povýšení falešných objektů do role primárního cíle, ale také prodlužuje dobu do zvolení legitimního objektu jako primárního cíle.	Vede k častějšímu zvolení falešného objektu jako primárního cíle tempomatu.

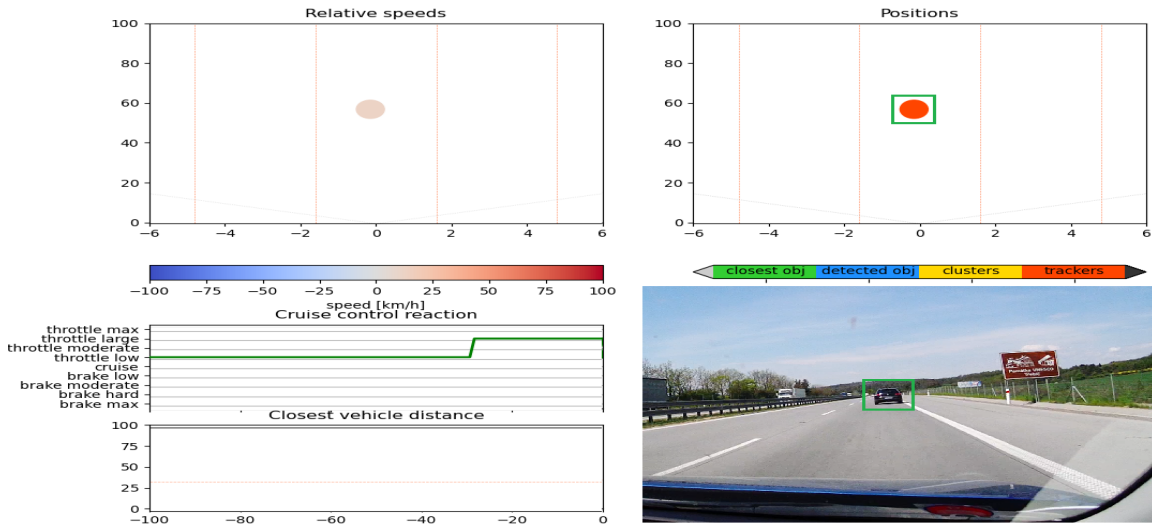
Testování firmwaru

Testování implementovaného firmwaru probíhalo podobně, jako testování prototypu. K vizualizaci výsledků byl využit prototyp spuštěný v režimu pouhého zobrazování dat. Nebylo provedeno tolik různých testovacích případů, protože implementovaný firmware nepodává tak spolehlivé a přesné výsledky jako prototyp. Proto byl kladem důraz spíše na aplikaci prototypu a její důsledné testování.

Snímky 7.12 a 7.13 demonstrují funkčnost implementovaného systému. Na obrázku 7.12 je vidět situace, kdy je vozidlo, jež je zároveň primárním cílem, vzdáleno přibližně 60 metrů od referenčního vozidla. V grafu reakce je vidět změna reakce z mírné akcelerace na intenzivní. To je jednou z vlastností zjednodušené logiky výběru reakce – nejsou využity všechny reakční hladiny, jaké používá prototyp se svojí fuzzy logikou výběru nastavení reakce. Na grafech si lze taktéž povšimnout, že není měřen vývoj vzdálenosti od primárního cíle, nejsou

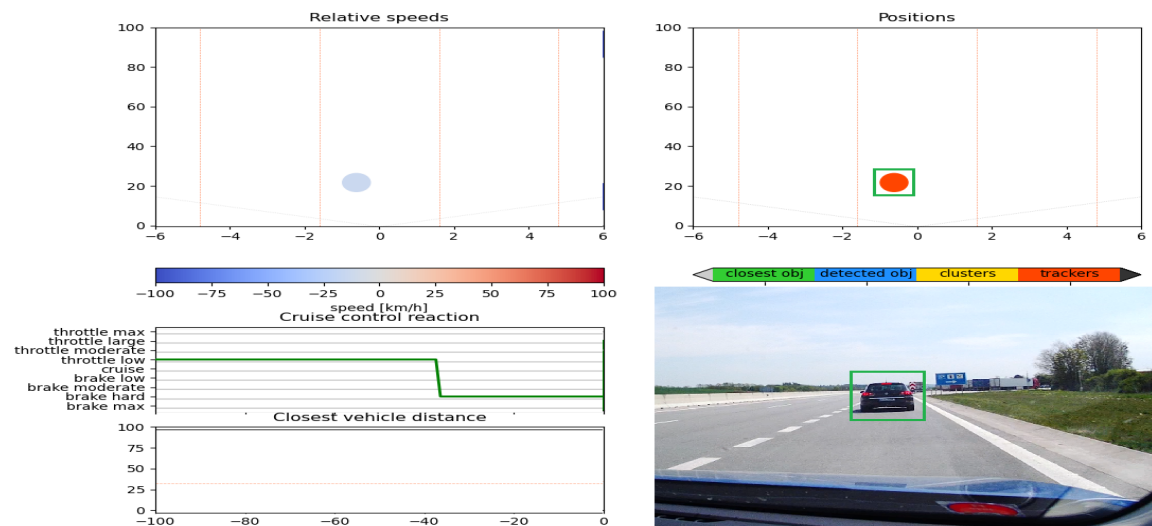
¹Označení *Shared* neodkazuje na název třídy, ale na název souboru `shared.py`.

rozišeny jednotlivé operační režimy adaptivního tempomatu a primární cíl není barevně odlišen od ostatních objektů. Tyto informace nejsou přenášeny v rámci datových paketů a proto nejsou zobrazeny. Výhodou jednoduššího rozhraní je rychlost zpracování, která byla ve všech situacích schopná bez problémů běžet v reálném čase.



Obrázek 7.12: Ukázka správně vyhodnocené situace firmwarem ve větší vzdálenosti od vpředu jedoucího vozidla.

Podobně na obrázku 7.13 je vidět situace, když se vozidla přibližují a dochází ke změně reakce na brzdění. Tato situace je opět vyhodnocena správně. Obecně lze říci, že firmware sdílí s prototypem podobné přednosti i slabiny, což je vzhledem ke stejnému algoritmic-kému základu a použitému radaru logické. Prototyp však disponuje, vzhledem ke snazší implementaci, robustnějšími principy a ve většině situací tak podává lepší výsledky.



Obrázek 7.13: Ukázka správně vyhodnocené situace firmwarem, kdy se vozidla přibližují a dojde k brzdění.

Zajímavým poznatkem byl občasný problém se synchronizací přijatých upravených paketů. Přestože na straně radaru po přidání TLV bloku obsahujícího reakci tempomatu došlo ke správné úpravě všech ovlivněných hodnot v hlavičce rámce, čas od času byl tento přidávaný blok odeslán až na začátku dalšího odeslaného rámce místo na konci rámce předchozího. K tomuto chování však dochází v náhodných intervalech a pravděpodobně je způsobený nějakou vnitřní synchronizací událostí v jednotce MSS radarového modulu. Při experimentu, kdy byly z radaru odesílány rámce obsahující pouze samotnou reakci (byl tedy vždy vytvořen úplně nový rámec, v němž se neobjevovaly detekované objekty), k nesynchronizaci dat nedocházelo. Ve finální implementované verzi však jsou zasílány všechny objekty i přes vznik nesynchronizací, aby bylo možné lépe vizualizovat výstup. Zároveň také bylo zjištěno, že vznik nesynchronizace vede pouze ke ztrátě bloku TLV obsahujícího aktuální reakci. Ta je však v dalším rámci přijata korektně a výpadek je téměř nerozeznatelný.

7.4 Porovnání s radarem RFbeam K-MC4

Autor v rámci své předchozí, bakalářské, práce (viz [15]) zpracovával podobné téma s využitím zcela jiného radaru. Tím byl radarový modul K-MC4 vyráběný firmou RFbeam Microwave GmbH. Tento FMCW radar operuje ve frekvenčním pásmu 24 GHz a disponuje jednou vysílací a dvěma přijímacími anténami. V rámci předchozí práce byl využit jako senzor pro implementaci prototypu adaptivního tempomatu v prostředí Matlab.

Radar K-MC4 ve srovnání s AWR1843 nedisponuje subsystémem DSP pro zpracování dat přímo na čipu radaru. Má k dispozici také menší počet vysílacích a přijímacích antén. Má také výrazně slabší detekční vlastnosti na delší vzdálenost.

Při porovnání obou implementovaných systémů hovoří přesnost a spolehlivost jednoznačně pro radar AWR1843. Díky pokročilým algoritmům zpracování signálu přímo na čipu, jako je např. algoritmu dBScan a rozšířený Kalmanův filtr, poskytuje velmi čistá data a přesně detekované objekty. Naopak frekvenční spektrum signálu z radaru K-MC4 bylo velmi zašuměné a vzdálenější objekty byly často ztraceny mezi šumem a tedy nedetekovatelné.

Z kvality zpracovaných surových dat pak vychází určení samotných reakcí systému adaptivního tempomatu. I v tomto případě srovnání hovoří výrazně ve prospěch systému využívajícího radar AWR1843.

7.5 Zhodnocení výsledků, vylepšení a pokračování práce

Na základě testování prototypu postaveném nad daty z radaru AWR1843 lze tvrdit, že systém poskytuje dobré výsledky, a tedy je radarový modul TI AWR1843 využitelný jako senzor pro radarový adaptivní tempomat. Implementovaná aplikace je schopná běžet v reálném čase. Zejména je třeba vyzdvihnout jeho funkčnost na rovných úsecích dálnic, kde dosahuje až do vzdálenosti kolem 90 metrů téměř bezchybných výsledků. Ukázalo se také, že využití vysílaného signálu využívajícího pouze MRR subrámce v režimu beamforming přineslo lepší výsledky než jeho kombinace s vysoce přesnými USRR subrámcí v režimu MIMO. Tento typ signálu je vhodný pro jiný druh aplikací, např. parkovacího asistenta nebo systému detekce mrtvého úhlu, kde je důležitější široké zorné pole než dlouhá detekční vzdálenost.

Největšími slabinami systému je detekce cílů v prudších zatáčkách a v některých případech také výběr primárního cíle tempomatu. Chování systému v těchto situacích by se mohlo zlepšit například využitím různých heuristických metod.

V rámci práce byl také implementován a testován firmware použitého radarového modulu fungující jako adaptivní tempomat, postavený nad ukázkovou aplikací *Medium Range Radar*. Algoritmus adaptivního tempomatu je implementován jako zjednodušená verze algoritmu vytvořeného v rámci prototypu. Systém je funkční a v základních situacích podává uspokojivé výsledky. Díky podobnosti algoritmů má firmware podobné přednosti a nedostatky jako prototyp.

Pokračování práce by mohlo zahrnovat kupříkladu integraci reálného rychloměru, který by poskytoval informace o aktuální rychlosti vozidla. Také by bylo možné přidat další zdroj informací, např. kamerový záznam, a tato data využívat pro zlepšení rozhodování systému adaptivního tempomatu. Pravděpodobně nerealizovatelným, přesto velmi zajímavým experimentem, by bylo reálné připojení systému k vozidlu a ověření jeho funkčnosti ve spolupráci se všemi jednotkami ovládajícími vozidlo.

Kapitola 8

Závěr

Cílem této diplomové práce byla implementace softwarového systému adaptivního tempomatu s využitím radarového senzoru, jeho následné otestování a zhodnocení využitelnosti daného radaru jako senzoru adaptivního tempomatu. Výsledkem práce jsou dva implementované systémy. Prvním je aplikace prototypu adaptivního tempomatu implementovaná v programovacím jazyce Python, která zároveň umožňuje vizualizaci dat. Druhým systémem je pak systém adaptivního tempomatu implementovaný jako firmware radarového modulu TI AWR1843.

Pro úspěšné řešení práce byly nastudovány nejrůznější informace týkající se radarů a tempomatů. Mezi ně patří obecnější informace o radarech a tempomatech nebo různé fyzikální principy týkající se radarových systémů. Dále také byly nastudovány různé metody extrakce dat z konkrétní třídy radarů, např. měření vzdálenosti a rychlosti radarem. V rámci práce byla také vytvořena komplexní datová sada, na jejímž základě byly systémy vyvíjeny, laděny a testovány. Na závěr bylo provedeno důkladné testování systémů v reálném čase a provozu. Lze tedy říci, že všechny body zadání byly splněny.

Testování prototypu, který je robustnějším z implementovaných systémů, přineslo velmi slušné výsledky. Zejména je třeba vyzdvihnout jeho téměř stoprocentní spolehlivost při jízdě na rovném úseku dálnice, kde dokáže správně vyhodnotit situaci až do vzdálenosti okolo 90 metrů. Naopak slabší stránkou je vyhodnocování při jízdě v prudších zatáčkách a občasná problémy při výběru primárního cíle adaptivního tempomatu.

Testování firmwaru radarového modulu prokázalo jeho základní funkčnost. Nicméně vzhledem k problémům při ladění a složitějšímu postupnému testování nepodává systém tak spolehlivé a přesné výsledky jako prototyp.

Na základě všech provedených testů v nejrůznějších dopravních situacích a v různých konfiguracích aplikací i radaru lze říci, že radarový modul TI AWR1843 je využitelný jako senzor radarového adaptivního tempomatu pro jízdu na dálnici.

Práce mi dala široký rozhled na poli tempomatů a milimetrových radarů. Zároveň jsem si také vyzkoušel programování firmwaru komerčně nabízeného produktu od renomované firmy, s čímž jsem dosud neměl žádné zkušenosti.

Pokračování práce by bylo možné mnoha směry. Jedním z nich je vylepšení implementace firmwaru. Oběma systémům by velmi pomohlo připojení k rychloměru vozidla pro získávání aktuální rychlosti. Také by mohla být zajímavá integrace nějakého dalšího zdroje dat, například palubní kamery, jehož data by přispívala k lepšímu vyhodnocování situací. A konečně by mě osobně velmi lákala představa připojení systému k reálným řídicím systémům vozidla a jeho otestování jako plnohodnotného adaptivního tempomatu.

Literatura

- [1] BHATTA, N. a PRIYA, M. RADAR and its applications. *International Conference on Novel Issues and Challenges in Science & Engineering* [online]. Leden 2017, sv. 9, č. 28, s. 1–9, [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317427496_RADAR_and_its_Applications.
- [2] *Different types of radar systems* [online]. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: <https://lidarradar.com/definition/different-types-of-radar-systems>.
- [3] ESTER, M., KRIEGEL, H.-P., SANDER, J. a XU, X. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. In: *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. March 1996, sv. 4, č. 60, s. 226–231 [cit. 2020-04-24]. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2178427. ISSN 1557-9670. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6127923/>.
- [4] FAUS GARCÍA Óscar. *Signal Processing for mmWave MIMO Radar* [online]. Gävle, Švédsko, 2015. [cit. 2020-04-24]. Diplomová práce. University of Gävle, Faculty of Engineering and Sustainable Development. Dostupné z: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:826028/FULLTEXT01.pdf>.
- [5] GUARNIERI, M. The Early History of Radar. *Industrial Electronics Magazine* [online]. Říjen 2010, sv. 4, č. 3, s. 36 – 42, [cit. 2020-01-10]. DOI: 10.1109/MIE.2010.937936. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5613524>.
- [6] HALLIDAY, D., RESNICK, R. a WALKER, J. *Fyzika 1*. 2. vyd. VUTIUM, 2013. 479-482 s. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [7] HASCH, J., TOPAK, E., SCHNABEL, R., ZWICK, T., WEIGEL, R. et al. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. March 2012, sv. 60, č. 3, s. 845–860, [cit. 2020-01-13]. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2178427. ISSN 0018-9480. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6127923/>.
- [8] HOLLP, W. *The Century of Radar: from Christian Hülsmeier to Shuttle Radar Topography Mission* [online]. [cit. 2019-12-15]. [Online; navštíveno 15. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.100-jahre-radar.fraunhofer.de/vortraege/Holpp-The_Century_of_Radar.pdf.
- [9] ILIUDIS, C. Introduction to Radar Signal Processing. [online]. University of Strathclyde. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <https://udrc.eng.ed.ac.uk/sites/udrc.eng.ed.ac.uk/files/attachments/Introduction%20Radar%20signal%20processing.pdf>.

- [10] KAVURUCU, Y. a ENSARI, T. Predictive cruise control. In: *2017 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)* [online]. 2017, s. 1–4 [cit. 2020-05-01]. DOI: 10.1109/EBBT.2017.7956763. ISBN 978-1-5386-0440-3. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7956763>.
- [11] LYONS, R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. 1. vyd. Prentice Hall PTR, 2004. ISBN 0-201-63467-8.
- [12] MARSDEN, G., MCDONALD, M. a BRACKSTONE, M. Towards an understanding of adaptive cruise control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. Únor 2001, sv. 9, č. 1, s. 33–51, [cit. 2020-01-10]. DOI: 10.1016/S0968-090X(00)00022-X. ISSN 0968090X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X0000022X>.
- [13] MOON, S., KANG, H.-J. a YI., K. Multi-vehicle target selection for adaptive cruise control. *Vehicle System Dynamics* [online]. 2010, sv. 48, s. 1325–1343, [cit. 2020-04-28]. DOI: 10.1080/00423114.2010.499952. ISSN 0042-3114. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/254220226_Multi-vehicle_target_selection_for_adaptive_cruise_control/references.
- [14] PANANURAK, W., THANOK, S. a PARNICHKUN, M. Adaptive Cruise Control for an Intelligent Vehicle. In: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. IEEE, Březen 2009, s. 1794 – 1799. DOI: 10.1109/ROBIO.2009.4913274. ISBN 978-1-4244-2678-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4913274/>.
- [15] ROUS, P. *Radarový adaptivní tempomat* [online]. Brno, CZ, 2017. [cit. 2020-01-10]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Dostupné z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis/19280/>.
- [16] SANDEEP RAO. *MIMO radar* [online]. Texas Instruments Inc., červenec 2018 [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/swra554a/swra554a.pdf?ts=1589810844392>.
- [17] SANDEEP RAO. *Introduction to mmwave Sensing: FMCW Radars* [online]. Texas Instruments Inc., září 2019 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: https://training.ti.com/sites/default/files/docs/mmwaveSensing-FMCW-offlineviewing_4.pdf.
- [18] SEVGI, L. Radar. In: BANSAL, R., ed. *Handbook of Engineering Electromagnetics*. 1. vyd. CRC Press, 2006, kap. 10, s. 1–35 [cit. 2020-01-10]. DOI: 10.1201/9781420007251.ch1. ISBN 978-0-8493-7363-3.
- [19] SHAOUT, A. a JARRAH, M. Cruise control technology review. *Computers & Electrical Engineering*. 1997, sv. 23, č. 4, s. 259 – 271. DOI: 10.1016/S0045-7906(97)00013-X. ISSN 0045-7906. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004579069700013X>.
- [20] SKOLNIK, M. I. *Radar handbook*. 3. vyd. The McGraw-Hill Companies, 2008. ISBN 978-0-07-148547-0.
- [21] *The fundamentals of millimeter wave sensors* [online]. Texas Instruments Inc. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/spyy005/spyy005.pdf>.

- [22] TEXAS INSTRUMENTS INC.. *AWR1843 Single-Chip 77- to 79-GHz FMCW Radar Sensor* [online]. [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/swrs222a/swrs222a.pdf>.
- [23] TEXAS INSTRUMENTS INC.. *TI mmWave Labs: Medium Range Radar - Developer's Guide* [online]. 2017 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: http://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=APkoqQrDmfEOWhcyZY68WA__AocYeEd__LATEST.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS INC.. *Design Guide: TIDEP-01012 Imaging Radar Using Cascaded mmWave Sensor Reference Design* [online]. 2019, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/tiduen5a/tiduen5a.pdf?ts=1589898269016>.
- [25] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Radar* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2020 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radar>.
- [26] WIKIPEDIE. *Tempomat* — *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2017 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tempomat>.
- [27] WINKLER, V. Range Doppler detection for automotive FMCW radars. In: *2007 European Radar Conference* [online]. Mnichov: IEEE, 2007, s. 166–169 [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1109/EURAD.2007.4404963. ISBN 978-2-87487-004-0. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4404963>.
- [28] WOLFF, C. *Radar tutorial*. 1998 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/index.en.html>.
- [29] YANG, ZIGANG AND ANIL MANI. *Interference Mitigation For AWR/IWR Devices* [online]. Texas Instruments Inc., leden 2020 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra662/swra662.pdf?ts=1590416266374>.
- [30] ZHANG, G., WANG, Z., FAN, B., ZHAO, L. a QI, Y. Adaptive cruise control system with traffic jam tracking function based on multi-sensors and the driving behavior of skilled drivers. *Advances in Mechanical Engineering* [online]. Zář 2018, sv. 10, č. 9, [cit. 2020-05-02]. DOI: 10.1177/1687814018795801. ISSN 1687-8140. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/327553125>.

Příloha A

Obsah přiloženého paměťového média

Příložené DVD obsahuje kompletní sadu všech zdrojových kódů textu práce, prototypu aplikace v Pythonu a firmwaru radarového modulu.

Adresářová struktura DVD je následující:

```
/
├── python_prototype
│   ├── configs - obsahuje konfigurační soubor config.ini
│   ├── records - uložené testovací nahrávky včetně videozáznamů
│   ├── src - zdrojové soubory
│   └── RadarAcc.exe - spustitelná verze aplikace
├── radar_firmware
│   ├── DSS - zdrojové soubory subsystému DSS
│   │   └── dss_firmware.bin - sestavený firmware pro DSS
│   ├── MSS - zdrojové soubory subsystému MSS
│   │   ├── mss_firmware.bin - sestavený firmware pro MSS
│   │   └── acc - zdrojové soubory adaptivního tempomatu
└── thesis - zdrojové soubory textu práce
    └── DP_xrousp00.pdf - text práce
```

Příloha B

Manuál k aplikaci RadarACC

Zkompilovaná aplikace `RadarACC.exe` je přímo spustitelná na operačních systémech Windows. Pro svůj korektní běh očekává existenci adresáře `configs/` ve stejné adresářové úrovni, kde se nachází spustitelný soubor. Složka `configs/` pak musí obsahovat konfigurační soubor aplikace pojmenovaný `config.ini`. Jeho obsah je popsán v příloze C. Binární spustitelný soubor byl vytvořen použitím programu `pyinstaller` následujícím příkazem:

```
pyinstaller.exe -onefile RadarAcc.py
```

ve složce obsahující zdrojové soubory.

Aplikaci lze spustit také přímo ze zdrojových souborů umístěných ve složce `src`. Pro spuštění je vyžadován interpret Python 3.8 (vývojovou verzí je Python 3.8.2) s nainstalovanými všemi vyžadovanými balíky. Jejich výčet je uveden v souboru `requirements.txt` a lze je automatizovaně nainstalovat příkazem

```
python -m pip install -r requirements.txt
```

spuštěným ve složce se zdrojovými soubory.

Následně již lze spustit samotnou aplikaci z příkazové řádky příkazem

```
python RadarACC.exe [configFilePath]
```

kde volitelný argument `configFilePath` je cesta ke konfiguračnímu souboru `config.ini`. V případě jeho nezadání program očekává stejnou adresářovou strukturu jako binární spustitelný soubor `RadarACC.exe`.

Pro přehrání video záznamu je nutné nastavit v konfiguračním souboru `config.ini` hodnotu klíče `playVideo` v sekci `playback_config` na `yes`. Přehrávání videa je funkční pouze v módu přehrávání nahraného záznamu (klíč `funcMode` v sekci `main_config` na hodnotu 0). Video záznam musí být umístěný v podsložce `video` kořenové složky obsahující datový záznam (nastavitelná klíčem `playFolder` v sekci `playback_config`). Při spuštění zkompilované aplikace `RadarACC.exe` na některých strojích není možné video přehrát z důvodu chyby způsobené kompilací knihovny OpenCV programem `pyinstaller`. Nicméně při spuštění aplikace ze zdrojových souborů je přehrávání vždy funkční.

V konfiguračním souboru lze také nastavit hodnotu požadované vzdálenosti mezi vozidly klíčem `desiredDistance` v sekci `main_config`.

Pro pouhou vizualizaci výstupu radarových dat bez výpočtu reakce adaptivního tempomatu aplikací je nutné nastavit klíč `dataMode` v sekci `main_config` na hodnotu 1.

Příloha C

Konfigurační soubor

Níže je uveden vzor konfiguračního souboru aplikace RadarAcc.

```
[main_config]
# App function mode
# 0 - playback
# 1 - stream
# 2 - stream'n'record
funcMode = 0

# User/Data connection mode
# 0 - TCPIP connection mode
# 1 - serial mode
connMode = 1

# Recording path (used in mode 2)
recordingPath = <path>

# Data mode
# 0 - ACC mode computed by application
# 1 - ACC mode computed by radar firmware
dataMode = 0

# ACC desired distance between vehicles
# value should be of type integer
desiredDistance = 35

# Visualize all detected object or just trackers?
# 'yes' to visualize all detected objects and clusters
# 'no' to show just trackers
showAll = no

[tcPIP_config]
# configuration for connection mode 0
IPAddress = 10.0.38.201
userTCPport = 35789
```

```
dataTCPport = 35790

[serial_config]
# configuration for connection mode 1
userSerialPort = <COMx>
dataSerialPort = <COMy>

[playback_config]
playFolder = <path-to-record-directory>

# play speed up
playSpeed = 1
# start time offset (in seconds)
playStart = 0
# playback duration (max.)
playDuration = 100
# play video record, set to 'yes' to video be played or 'no'
playVideo = no

[visualizer_config]
# period of printed FPSload stats in seconds (0 for disable)
statsPeriod = 20
# requested visualizer FPS (lower values can reduce CPU load)
requestedFPS = 40
# point cloud scatter plot boundaries
wallBack = 0
wallFront = 100
wallLeft = -6
wallRight = 6
```